张燕宾 编著

变频调速600问










机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

变频调速600问

张燕宾　编著



机 械 工 业 出 版 社

本书在《变频调速460问》的基础上，增加了变频器的开关电源，CPU的外围电路，电流、电压以及其他参数的检测电路，IGBT的驱动电路，变频调速取代其他调速电动机，特殊电动机的变频调速等内容。

图书在版编目（CIP）数据

变频调速600问/张燕宾编著.—北京：机械工业出版社，2011.10(2012.11重印)

ISBN 978-7-111-36242-5

Ⅰ.①变…　Ⅱ.①张…　Ⅲ.①变频调速-问题解答　Ⅳ.①TM921.51-44

中国版本图书馆CIP数据核字（2011）第218273号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）

策划编辑：李振标　责任编辑：李振标

版式设计：霍永明　责任校对：李锦莉

封面设计：姚　毅　责任印制：杨　曦

北京京丰印刷厂印刷

2012年1月第1版·第1次印刷

140mm×203mm·17.75印张·540千字

0 001—3 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-36242-5

定价：49.80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

社服务中心：(010)88361066

销售一部：(010)68326294

销售二部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

网络服务

门户网：http://www.cmpbook.com

教材网：http://www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前　言

拙作《变频调速460问》自2006年1月出版迄今，已经过去了五年。在此期间，又有许多读者和用户向我咨询了不少问题，其中不乏有价值的。出版社的李振标编辑早就问我，是不是可以扩充到500多问了？

在读者咨询的问题中，常常有涉及变频器内部控制电路的问题，我一律以“得不到相关资料”为由而遗憾地无法解答，这也是实情。

最近，有读者向我推荐了几本介绍变频器内部控制电路的新书。

我已年逾古稀，早已萌发了不再学习新知识而颐养天年的念头。于是偷了个懒，把那几本书介绍给需要咨询的学员和读者们，让他们自己阅读去。偏有一位读者十分恳切地说：变频器的控制电路涉及的知识面颇广，在学校学过的知识又早已模糊了，更兼工作繁忙，压力很大，难以深入地阅读那些书，希望我能给予帮助。

作为一个通俗读物的写作者，读者是我的上帝，上帝提出要求了，我理应尽力而为。于是戴起老花眼镜，认真地学习起来。这才体会到了那位读者的苦衷，由于涉及的知识面较广，我在阅读时，也需要翻阅许多参考资料，以深入地理解相关的基础知识。对我来说，倒也得到了一种“活到老，学到老”的怡悦。

我所能做的，无非是在介绍某部分控制电路时，把相关的基础知识补充进去，当然，还需要开动脑筋，尽量地讲解得简单一点，通俗一点，算是为工作繁忙的电气工程师们做一点服务吧。

在变频调速的应用技术方面，还增加了变频调速取代其他调速电动机，特殊电动机的变频调速等内容。

这样一来，内容可就增加了许多，扩展成600问了。

既然我已托生为牛（我属牛），只要一息尚存，我这头老黄牛就在这一方土地上继续地耕耘下去吧。

笔　者

目　　录

前言
第 1 章　变频器的内部电路及工作特点 …… 1
1.1　变频器的整流与滤波电路 …… 1
问题 1　交-直-交是什么意思？ …… 1
问题 2　电压型和电流型变频器的主要特点是什么？ …… 1
问题 3　变频器的内部主电路是怎样构成的？ …… 2
问题 4　和滤波电容器并联的电阻起什么作用？ …… 3
问题 5　整流桥和滤波电容器之间为什么要接一个电阻和接触器（或晶闸管）？ …… 3
问题 6　限流电阻烧坏了怎么配？ …… 5
1.2　变频器的逆变电路 …… 5
问题 7　直流电是怎样变成交流电的？ …… 5
问题 8　IGBT 有什么特点？ …… 7
问题 9　为什么每个逆变管旁边都要反并联二极管？ …… 7
问题 10　变频器的主电路有哪些接线端子？ …… 8
问题 11　为什么变频器的输入和输出端绝对不允许接反？ …… 9
1.3　变频器内的各部分电流 …… 9
问题 12　变频器的输出电流和频率有关吗？ …… 9
问题 13　风机和水泵随着频率的下降，电流也减小是什么原因？ …… 10
问题 14　变频器的输入电流常常小于输出电流，是什么原因？ …… 11
问题 15　变频器各部分电流之间的关系怎样？ …… 11
问题 16　变频器的三相输入电流不平衡是正常现象吗？ …… 13
1.4　变频器控制电路中常见的电子器件 …… 15
问题 17　晶体管放大电路有哪些特点？ …… 15
问题 18　晶体管的射极跟随电路有哪些特点？ …… 16
问题 19　晶体管有几种基本工作状态？ …… 16
问题 20　运算放大器有些什么特点？ …… 17
问题 21　精密整流电路的特点是什么？ …… 19

问题22　光耦合器的工作特点如何？ …… 19
问题23　可控稳压管的特点是什么？ …… 20
问题24　什么是霍尔效应？ …… 21
问题25　霍尔传感器是怎样构成的？ …… 21
1.5　变频器控制电路的开关电源 …… 22
问题26　变频器的控制框图是怎样的？ …… 22
问题27　什么是开关电源？ …… 23
问题28　开关电源怎样稳压？ …… 24
问题29　开关电源有些什么优点？ …… 25
问题30　变频器从哪里向开关电源提供电源？ …… 26
问题31　变频器开关电源有多少低压绕组？ …… 27
问题32　采用分立元器件构成的开关电源怎样工作？ …… 27
问题33　采用振荡芯片构成的开关电源怎样工作？ …… 29
问题34　采用振荡芯片构成的开关电源怎样稳压？ …… 30
问题35　大容量变频器的开关电源有什么特点？ …… 30
1.6　CPU的外围电路 …… 31
问题36　CPU的时钟电路是怎样的？ …… 31
问题37　CPU的复位电路是怎样构成的？ …… 32
问题38　CPU怎样接收外部的模拟量信号？ …… 33
问题39　CPU怎样接收外部的开关量信号？ …… 33
问题40　CPU怎样输出模拟量信号？ …… 34
问题41　CPU怎样输出开关量信号？ …… 34
问题42　CPU怎样控制显示屏？ …… 35
1.7　变频器的电流采样电路 …… 36
问题43　能否从直流回路取出电流信号？ …… 36
问题44　能否利用电阻压降测量输出电路的电流？ …… 36
问题45　怎样用霍尔元件测量变频器的电流？ …… 37
问题46　怎样进行过电流的判别？ …… 38
问题47　怎样通过三相合成电流判断是否接地？ …… 39
问题48　怎样通过三相合成磁场判断是否接地？ …… 39
问题49　怎样判断快速熔断器是否熔断？ …… 40
1.8　电压和其他参数的检测 …… 40
问题50　变频器怎样直接检测直流电压？ …… 40
问题51　变频器怎样间接检测直流电压？ …… 41

问题 52　变频器怎样测量温度？ …… 42
问题 53　变频器里的风扇电路是怎样的？ …… 42
1.9　变频器的输出电压 …… 43
问题 54　变频的输出电压为什么要随频率下降？ …… 43
问题 55　什么是调频比？ …… 44
问题 56　什么是调压比？ …… 44
问题 57　什么是基本 U/f 线？ …… 45
问题 58　变频器怎样改变输出电压？ …… 45
问题 59　什么是正弦波脉宽调制？ …… 46
问题 60　怎样实现正弦波脉宽调制？ …… 46
问题 61　双极性调制是怎样工作的？ …… 47
问题 62　变频器的输出电压有什么特点？ …… 48
问题 63　怎样改变变频器的输出电压？ …… 49
问题 64　逆变管在交替导通时为什么需要死区时间？ …… 50
问题 65　载波频率会影响输出电压吗？ …… 50
问题 66　载波频率是怎样影响最大输出电流的？ …… 51
问题 67　为什么电磁噪声和载波频率有关？ …… 52
第 2 章　变频器的选型、安装与测量 …… 53
2.1　变频器的选型 …… 53
问题 1　选择变频器时，应注意些什么？ …… 53
问题 2　变频器有哪些额定数据？ …… 53
问题 3　变频器的最大输出电压能够高于输入电压吗？ …… 55
问题 4　变频器的额定输入电流为什么比输出电流大了许多？ …… 56
问题 5　频率精度和分辨率有什么区别？ …… 56
问题 6　变频器中的配用电动机功率能否作为选择依据？ …… 56
问题 7　在哪些情况下，可以按说明书中的配用电动机功率来选择变频器？ …… 57
问题 8　在哪些情况下，有必要考虑加大变频器的容量？ …… 58
问题 9　电动机为 132kW，实际使用功率约为 50kW，能否配用较小的变频器？ …… 59
问题 10　负载的最大工作频率为 40Hz，能否选用容量较小的变频器？ …… 59
问题 11　变频调速时电动机的功率需要比直流电动机加大一挡吗？ …… 59
问题 12　在选用潜水泵变频器时，应注意些什么？ …… 60

问题13　一台变频器带动多台电动机时怎样选择变频器容量？ …… 60
问题14　变频器的几种控制方式有哪些主要特点？ …… 61
2.2　变频器的安装 …… 61
问题15　变频器对周围环境有些什么要求？ …… 61
问题16　变频器长期不用会发生什么问题？ …… 61
问题17　电解电容器的寿命有多长？ …… 62
问题18　长期不用的电解电容器存在什么问题？如何恢复正常？ …… 62
问题19　安装变频器时应注意哪些问题？ …… 63
问题20　变频器壁挂式安装和柜式安装哪个好？ …… 64
问题21　在温度较高的控制室内是否一定要装空调？ …… 65
问题22　在灰尘较多的场合使用变频器时，怎么办？ …… 65
2.3　变频器的外接主电路 …… 65
问题23　低压断路器的作用是什么？怎样选择？ …… 65
问题24　变频器前面一定要加接触器吗？怎样选择？ …… 66
问题25　变频器前端是否需要加快速熔断器？ …… 67
问题26　变频器与电动机之间要不要接输出接触器？ …… 67
问题27　变频器与电动机之间是否需要接入热继电器？ …… 68
问题28　热继电器在变频器输出电路内容易误动作，何故？ …… 68
问题29　为什么变频器的输出线有时需要加粗？ …… 68
问题30　变频器与电动机之间的距离最多允许多远？ …… 69
问题31　电动机和变频器之间的距离较远时应采取哪些措施？ …… 70
2.4　改善功率因数的配件 …… 70
问题32　采用了变频器后功率因数究竟是高还是低？ …… 70
问题33　为什么不用电容器而用电抗器来改善功率因数？ …… 73
问题34　什么是12脉波整流？有什么好处？ …… 74
问题35　在变频调速系统中，电动机的功率因数是否无关紧要？ …… 75
问题36　能不能通过在变频器的输出端加电容器来改善功率因数？ …… 76
问题37　增加补偿电容为什么不能改善功率因数？ …… 76
问题38　交流电抗器和直流电抗器哪个效果好？ …… 77
问题39　还有哪些情况需要接入交流电抗器？ …… 77
问题40　怎样选择电抗器？ …… 78

问题 41　怎样自制小容量交流电抗器？ …… 79
问题 42　输出电抗器有什么作用？ …… 80
问题 43　输出电抗器发热严重是什么原因？能否缓解？ …… 81
2.5　抗干扰的配件 …… 82
问题 44　变频器有哪些干扰源？ …… 82
问题 45　变频器通过哪些途径干扰其他设备？ …… 82
问题 46　怎样防止线路传播引起的干扰？ …… 83
问题 47　买不到隔离变压器，怎么办？ …… 84
问题 48　怎样防止电磁辐射引起的干扰？ …… 85
问题 49　输入和输出滤波器有什么区别？ …… 86
问题 50　输入滤波器与噪声滤波器有什么异同？ …… 86
问题 51　怎样防止因感应引起的干扰？ …… 87
问题 52　变频器相互间是否干扰？ …… 88
问题 53　怎样防止外部脉冲对变频器的干扰？ …… 89
2.6　变频器的测量 …… 89
问题 54　变频器的哪些参数可以用常规仪表进行测量？ …… 89
问题 55　输出电压波的脉冲高度是 U_D，为什么仪表读数不是 U_D？ …… 90
问题 56　能不能用电磁系仪表测量输出电压？ …… 91
问题 57　为什么不能用数字式仪表测量输出电压？ …… 92
问题 58　为什么用整流系仪表测量变频器的输出电压是比较准确的？ …… 93
问题 59　市场上买不到整流系电压表怎么办？ …… 94
问题 60　用钳形电流表测量变频器的输入电流时，为什么读数偏小？ …… 95
问题 61　为什么输出侧可以用两表法测量三相电功率，输入侧却不能？ …… 96
问题 62　为什么不能用功率因数表测量变频器输入侧的功率因数？ …… 96
问题 63　用绝缘电阻表（兆欧表）直接检查变频器的绝缘电阻有哪些危害？ …… 97
第 3 章　频率调节与加减速 …… 99
3.1　变频器的键盘与功能预置 …… 99
问题 1　键盘输入器上主要配置哪些键？ …… 99

问题2　变频器的功能包括哪些方面？ …… 100
问题3　什么是功能码和数据码？ …… 101
问题4　变频器的功能码有哪几种编码规律？ …… 102
问题5　变频器出厂时已经把各种功能预置好了，为什么还要进行功能预置？ …… 103
问题6　进行功能预置一般需要哪些步骤？ …… 103
问题7　怎样找到需要预置的功能码？ …… 104
问题8　变频器主要应预置哪些功能？ …… 106
3.2　频率给定功能 …… 107
问题9　变频器有几种频率给定方式？ …… 107
问题10　变频器怎样决定采用何种给定方式？ …… 108
问题11　通过外接信号来改变电动机的旋转方向时须注意哪些问题？ …… 108
问题12　频率给定用电位器与说明书要求的不一样行不行？ …… 109
问题13　某控制器的输出信号为2～8V，要求变频器的对应频率是0～50Hz，如何处理？ …… 110
问题14　某变频器采用电位器给定方式，用户要求：当外接电位器从“0”位旋到底（给定信号为10V）时，输出频率范围为0～30Hz，如何处理？ …… 111
问题15　模拟量给定信号中，电压范围是1～5V，电流范围是4～20mA，为什么不从“0”开始？ …… 112
问题16　某仪器的输出电压信号是1～5V，但所购变频器的电压给定信号只能选0～10V，怎么办？ …… 113
问题17　微机的输出电压是0～5V，但变频器的实际频率范围为0～48Hz，是什么原因？如何修正？ …… 114
问题18　有一台变频器，当输入信号为0V时，输出频率却不为0Hz，是什么原因？ …… 114
问题19　变频器电压给定信号的范围是0～5V，但实际给定信号是1～5V，要求的频率范围是50～0Hz，怎么解决？ …… 115
问题20　某变频器无说明书，也看不清型号，控制端子中不知道哪个是电压信号输入端（有CM端），怎么办？ …… 115

问题 21　辅助给定信号与主给定信号之间是什么关系？…… 116
3.3　频率的相关功能 …… 117
问题 22　最高频率和基本频率有什么区别？…… 117
问题 23　上限频率和最高频率有什么区别？…… 118
问题 24　有一台鼓风机，每当运行在 20Hz 时，振动特别严重，怎么解决？…… 119
问题 25　22kW 的搅拌用电动机，工频运行时的满载电流是 41A，用了变频器后，50Hz 时的满载电流是 43A（额定电流是 42.5A），为什么？能否减小？…… 120
问题 26　为什么在容量、载波频率和输出频率都相同的情况下，不同变频器的输出电压（电动机满载运行）和电流不完全一样？…… 121
3.4　升速和起动功能 …… 121
问题 27　异步电动机的工频起动有什么特点？…… 121
问题 28　工频起动的起动过程有什么特点？…… 122
问题 29　工频直接起动对电力拖动系统有哪些弊端？…… 123
问题 30　软起动器起动有什么特点？…… 123
问题 31　转子串联电阻起动有什么特点？…… 124
问题 32　变频起动有些什么特点？…… 125
问题 33　什么是加速时间？加速时间和起动电流是什么关系？…… 125
问题 34　怎样计算变频器从 30Hz 上升到 45Hz 所需要的时间？…… 126
问题 35　决定加速时间的主要依据是什么？…… 127
问题 36　怎样了解电力拖动系统转动惯量的大小？…… 128
问题 37　上、下限频率是根据什么设定的？…… 129
问题 38　什么是 S 形加、减速方式？…… 130
问题 39　某风机在低速时起动电流不大，在起动到将近 50Hz 时容易跳闸，如何缩短加速起动时间？…… 131
问题 40　由于带式输送机静摩擦力较大而难以起动，怎么办？…… 131
问题 41　起动频率以多大为宜？…… 132
问题 42　某机床起动时齿轮箱齿轮间有撞击，影响齿轮的寿命，能否缓解？…… 132
问题 43　风机在不工作时，叶轮因自然通风而倒转，如何处理？…… 133
问题 44　给定信号不为“0”时，怎样起动电动机？…… 134

问题45　变频起动和软起动器起动有什么区别？………………… 134
3.5　降速和停机功能 …………………………………………… 135
问题46　电动机在降低频率时有什么特点？………………… 135
问题47　异步电机是怎样发电的？…………………………… 136
问题48　异步电动机在什么情况下能够发电？……………… 137
问题49　异步电动机的发电状态有什么特点？……………… 137
问题50　什么是泵升电压？…………………………………… 139
问题51　什么是减速时间？…………………………………… 139
问题52　斜坡制动和惯性制动有什么区别？………………… 140
问题53　怎样使电动机快速而准确地停机？………………… 140
问题54　变频器怎样实现直流制动？………………………… 141
问题55　有的变频器允许在额定频率下实施直流制动，
可以既不需要制动电阻、又能快速地停住，
是否算是一种较好的停机方式？……………………… 142
问题56　直流制动能否代替电磁制动电磁铁？……………… 142
问题57　如果选择了自由制动方式，应注意哪些问题？…… 143
问题58　在预置了下限频率后，变频器怎样停机？………… 143
问题59　风机在自由制动时，因为惯性大，停机时间很长，
能否使它发电？………………………………………… 143
问题60　在降速或停机过程中怎样防止直流电压过高？…… 144
3.6　制动电阻与制动单元 ……………………………………… 144
问题61　在哪些情况下需要配制动电阻？…………………… 144
问题62　怎样决定制动电阻的阻值？………………………… 145
问题63　怎样决定制动电阻的功率？………………………… 146
问题64　按照说明书选择制动电阻有问题吗？……………… 147
问题65　怎样进行制动电阻的热保护？……………………… 148
问题66　怎样进行制动电阻的并联？………………………… 149
问题67　制动电阻经常因过热而报警，怎么处理？………… 149
问题68　自己能否制作制动电阻？…………………………… 149
问题69　制动单元是怎样工作的？…………………………… 151
问题70　制动单元在运行过程中损坏了，怎样处理才
不耽误生产？…………………………………………… 152
问题71　22kW变频器配同功率电动机，起、制动
比较频繁，按说明书配10Ω/5kW制动电阻，发热严重，

怎么处理？……………………………………………… 153
问题 72　一开机制动电阻就烫，是什么原因？……………… 154
问题 73　变频器对制动电阻和制动单元有哪几种配置？………… 154
第 4 章　控制方式及应用 ……………………………………… 156
4.1　电动机的带负载能力 …………………………………… 156
问题 1　异步电动机的机械特性说明什么问题？ ……………… 156
问题 2　负载的机械特性说明什么问题？ …………………… 157
问题 3　电力拖动系统的运行状态是怎样决定的？ …………… 158
问题 4　怎样评价电动机的机械特性？ ……………………… 159
问题 5　影响异步电动机机械特性的参数有哪些？ …………… 160
4.2　变频器的控制方式 ……………………………………… 160
问题 6　什么是控制方式？ ………………………………… 160
问题 7　变频器有几种控制方式？ ………………………… 161
问题 8　各种控制方式的主要特点和应用范围如何？ ………… 161
4.3　V/F 控制方式 ………………………………………… 162
问题 9　变频的同时为什么还要变压？ ……………………… 162
问题 10　怎样简单地表示调频与调压的关系？………………… 163
问题 11　*U/f* 比和电动机的带负载能力是什么关系？ ………… 164
问题 12　电压和频率保持正比关系不行吗？………………… 164
问题 13　为什么变频器要设置许多 *U/f* 线供用户选择？……… 166
问题 14　转矩提升量的上限值以多大为宜？………………… 168
问题 15　怎样决定转矩提升量？…………………………… 169
问题 16　自动转矩提升有什么特点？……………………… 169
问题 17　*U/f* 比大一些不好吗？ ………………………… 170
问题 18　什么是低励磁压频比？…………………………… 171
问题 19　有没有补偿得正好的 *U/f* 线？ …………………… 172
4.4　V/F 控制方式的派生功能 ……………………………… 173
问题 20　什么是转差补偿？………………………………… 173
问题 21　为什么风机在变频 50Hz 时的风量比工频
运行时小？能否加大？……………………………… 173
问题 22　什么是下垂功能？………………………………… 174
问题 23　负载增大时常出现堵转，如何解决？……………… 175
4.5　V/F 控制的应用 ………………………………………… 175
问题 24　V/F 控制时，“负载越大、电流也越大”

的规律不成立吗？ …… 175
问题25　变频器有时在轻载时出现过电流保护，原因是什么？ …… 176
问题26　某离心浇铸机，电动机功率为110kW，选用日立SJ300系列变频器。开始起动时能转起来，但升速到5Hz时就跳闸。什么原因？怎样解决？ …… 177
问题27　*U/f* 比对起动过程有何影响？延长起动时间能否减小 *U/f* 比？ …… 178
问题28　变频器在50Hz运行时，进线电流常常比工频运行时大，何故？ …… 179
问题29　有一台变频器，原来用在带式输送机上，后改用到风机上，起动时，频率刚上升到10Hz左右，就因过电流而跳闸，是什么原因？ …… 180
4.6　基本频率的调整 …… 180
问题30　为什么说在一般情况下不宜调整基本频率？ …… 180
问题31　有一台进口电动机，额定数据：420V，60Hz。在380V的情况下，怎样预置基本频率？ …… 180
问题32　某郊区的工厂，网络电压偏低，通常只有350V左右，电动机带负载时电流偏大，能用变频器吗？ …… 181
问题33　有一台机器，电动机数据：$P_{MN}=280kW$，$I_{MN}=506A$，配用315kW的变频器。常在40Hz的频率下运行，但电动机的运行电流达540A，发热严重，调整转矩提升不起作用，怎么办？ …… 181
问题34　三相220V的电动机怎样配用变频器？ …… 182
问题35　电动机的额定电压为380V，能否配用220V"单进三出"的变频器？ …… 185
问题36　电动机的额定频率是50/60Hz，把基本频率预置为50Hz和预置为60Hz有什么区别？ …… 186
问题37　额定频率为60Hz的电动机用到50Hz的电源上时，空载电流偏高，是什么原因？ …… 187
问题38　有一台电动机的额定电压是360V，额定频率是67Hz，配用380V的变频器时，怎样处理？ …… 188
4.7　矢量控制 …… 188
问题39　什么是矢量控制？ …… 188
问题40　无反馈矢量控制与有反馈矢量控制有什么区别？ …… 189

问题 41　什么是自动检测？怎样进行？……………………………… 190
问题 42　怎样使用旋转编码器？……………………………………… 191
问题 43　普通电动机怎样安装旋转编码器？………………………… 193
问题 44　哪些情况不能应用矢量控制方式？………………………… 193
问题 45　应用矢量控制方式时，显示屏显示的频率很不稳定，
是什么原因？………………………………………………… 194
问题 46　采用了矢量控制后，在 0Hz 时也能产生转矩吗？………… 194
问题 47　怎样选择控制方式？………………………………………… 194
问题 48　某系统：$T_L=686$N·m，$n_L=(1\sim4)$r/min，传动比：
$\lambda=200$。原选 JD02-22-8/4 变极电动机，
$n_{MN}=680/1360$r/min，0.45/0.75kW。打
算改用不变极电动机配合变频调速，问电动
机选 4 极还是选 8 极？……………………………………… 195
问题 49　矢量控制时为什么在未接电动机前会“出错”？ ………… 196
问题 50　什么是四象限运行？………………………………………… 196
问题 51　电动机的哪些工作状态出现在第Ⅱ象限？………………… 197
问题 52　电动机的哪些工作状态出现在第Ⅲ象限？………………… 198
问题 53　电动机的哪些工作状态出现在第Ⅳ象限？………………… 199
4.8　矢量控制方式的派生功能 ………………………………………… 200
问题 54　转矩控制和转速控制有什么区别？………………………… 200
问题 55　转矩控制的工作特点是什么？……………………………… 201
问题 56　转矩控制和转速控制之间怎样相互切换？………………… 202
问题 57　电梯和电气机车采用转矩控制有什么好处？……………… 203
问题 58　卷绕机械采用转矩控制有什么好处？……………………… 205
4.9　变频调速系统的有效转矩线 ……………………………………… 207
问题 59　怎样描述变频调速系统的带负载能力？…………………… 207
问题 60　低频运行时有效转矩为什么变小？………………………… 208
问题 61　怎样使普通电动机实现恒转矩调速？……………………… 209
问题 62　高频运行时有效转矩为什么变小？………………………… 209
问题 63　电动机的工作频率最高可以到多大？……………………… 210
问题 64　如把基本频率预置为 45Hz 会有什么结果？ ……………… 211
问题 65　低频运行时，电动机的功率会变小吗？…………………… 211
第 5 章　变频器的控制电路 …………………………………………… 213
5.1　变频器控制电路的安排 …………………………………………… 213

问题 1　变频器内部控制电路框图是怎样的？ ………………………… 213
问题 2　变频器和外部控制电路之间是怎样联系的？ ……………… 214
问题 3　变频器的外接输入端子有哪些？ ……………………………… 215
问题 4　变频器是怎样接收外接开关量信号的？ …………………… 215
问题 5　变频器的外接输出端子有哪些？ ……………………………… 216
问题 6　变频器是怎样提供外接开关量信号的？ …………………… 217
5.2　变频器的外接输入端子 …………………………………………… 218
问题 7　怎样确定通过外接端子进行操作？ ………………………… 218
问题 8　变频器外接的基本操作功能有哪些？ ……………………… 218
问题 9　变频器怎样实现点动控制？ …………………………………… 219
问题 10　什么是三线控制？ …………………………………………… 219
问题 11　有一台机器需要经常点动，原来的点动与运行的切换电路如图 5-9a 所示。改为变频调速后希望操作方法不变，怎么处理？ ………………………… 220
问题 12　变频器怎样实现外接升、降速控制？ ………………………… 221
问题 13　升、降速端子可以代替电位器吗？ …………………………… 221
问题 14　锅炉风机变频调速时要求在炉前和楼上控制室都能调速，怎样实现？ ……………………………………………… 222
问题 15　怎样利用电触点压力表实现简易的恒压供水控制？ ……… 223
问题 16　怎样实现多挡转速控制？ …………………………………… 224
问题 17　进行多挡转速控制时须预置哪些功能？ …………………… 225
问题 18　怎样利用继电器进行多挡转速控制？ ……………………… 226
问题 19　同一个电力拖动系统，有必要改变加、减速时间吗？ ……………………………………………………… 227
问题 20　怎样实现多挡加减速控制？ ………………………………… 227
问题 21　进行多挡加减速控制时须预置哪些功能？ ………………… 228
问题 22　桥式起重机的大车和小车如不允许同时运行，能否共用 1 台变频器？ ……………………………………………… 229
问题 23　外接输入端子可以预置哪些选择功能？ …………………… 230
5.3　变频器的外接输出端子 …………………………………………… 231
问题 24　怎样利用报警输出端子？ …………………………………… 231
问题 25　怎样选择和处理外接测量仪表？ …………………………… 231
问题 26　外接仪表的读数与显示屏不一样，怎么办？ ……………… 232
问题 27　能否通过模拟量输出信号得到较多档次的控制信号？ …… 233

问题 28 怎样利用多功能输出端子？ …… 233
问题 29 “频率到达”和“频率一致”有些什么区别？ …… 234
问题 30 外接输出端子有哪些状态输出信号？ …… 235
问题 31 某起升机构，希望显示“零速运行”和“停止”，以及“上升”和“下降”，怎样设计其显示电路（变频器为安川 G7A 系列）？ …… 236
问题 32 搅拌机与输送带间联动，要求输送带工作频率大于 30Hz 时，搅拌机才能起动，如输送带工作频率小于 25Hz，搅拌机必须停机，怎样实现？ …… 237
5.4 变频调速系统的基本控制电路 …… 238
问题 33 能否通过接通变频器电源来起动电动机？ …… 238
问题 34 怎样正确地控制电动机的起动和停止？ …… 238
问题 35 能不能用按钮直接起动电动机？ …… 239
问题 36 怎样更改电动机的旋转方向？ …… 240
5.5 变频运行和工频运行的切换 …… 242
问题 37 有哪些场合需要进行变频和工频的切换？ …… 242
问题 38 对变频和工频的切换过程有些什么要求？ …… 242
问题 39 变频和工频切换时，在哪些情况下可能出现大电流？ …… 243
问题 40 怎样避免切换时的冲击电流？ …… 246
问题 41 水泵切换时怎样防止过大的冲击电流？ …… 246
问题 42 能否从工频运行切换至变频运行？ …… 247
5.6 东芝变频器的切换功能介绍 …… 248
问题 43 东芝变频器的切换特点有哪些？ …… 248
问题 44 东芝变频器怎样起动电动机？ …… 249
问题 45 东芝变频器怎样从变频运行切换到工频运行？ …… 250
问题 46 东芝变频器在发生故障时怎样切换到工频运行？ …… 251
问题 47 东芝变频器怎样从工频运行切换到变频运行？ …… 252
5.7 变频器跳闸后的故障切换电路 …… 253
问题 48 怎样设计直接起动的故障切换电路？ …… 253
问题 49 怎样设计自耦变压器减压起动的故障切换电路？ …… 254
问题 50 怎样设计 Y-Δ 起动的故障切换电路？ …… 256
5.8 变频器的程序控制 …… 259

问题 51　某脱水机，要求低速运行 3min 后又分别用中速和高速各脱水 2min，各转速段都要有指示灯指示，怎样实现？ …… 259
问题 52　某搅拌装置的要求如下：先以 45Hz 正转运行 30min，再以 35Hz 反转运行 20min，每次改变方向前应先将转速降低至 10Hz 运行 1min，并发出准备检测的指示，然后停止运行 1min，由操作人员进行检测。如此循环不已，直至按下停止运行的按钮，怎样实现？ …… 260
问题 53　某提升机控制示意图如图 5-50 所示。要求：按 SF 低速上升时，碰 SQ2 后加速，碰 SQ3 后又减为低速，碰 SQ4 后停止；按 SR 时低速下降时，SQ3 复位后高速下降，碰 SQ2 复位后又减为低速，SQ1 复位后停止，怎样实现？ …… 263

5.9　变频调速的同步控制 …… 265

问题 54　现欲进行多单元同步控制，各单元可由操作工手动调整，怎样实现？ …… 265
问题 55　某印染机共有 6 个单元，都配置了变频调速系统，要求自动同步运行，如何实现？ …… 268

5.10　变频器与 PLC 的配合 …… 269

问题 56　PLC 内的电源配置是怎样的？ …… 269
问题 57　PLC 是怎样输入控制信号的？ …… 270
问题 58　PLC 是怎样输出控制信号的？ …… 271
问题 59　什么是 PLC 的“软继电器”？ …… 272
问题 60　怎样编制 PLC 的程序？ …… 274
问题 61　怎样用 PLC 来控制电动机的正转起动和停止？ …… 275
问题 62　怎样用 PLC 来控制电动机的正、反转运行？ …… 278
问题 63　怎样用 PLC 来进行变频与工频的切换控制？ …… 280
问题 64　怎样设计多挡转速控制电路？ …… 282

第 6 章　变频调速的闭环控制 …… 286

6.1　闭环控制的概念 …… 286

问题 1　闭环控制要达到什么目的？ …… 286
问题 2　什么是目标信号？什么是反馈信号？ …… 287
问题 3　怎样实现被控制的物理量稳定在所希望的数值？ …… 287
问题 4　为什么要加入比例增益？ …… 288

问题 5　积分环节和微分环节起什么作用？ …… 289
6.2　闭环系统的控制逻辑 …… 291
问题 6　什么是负反馈？ …… 291
问题 7　什么是正反馈？ …… 292
问题 8　变频器怎样预置反馈逻辑？ …… 292
6.3　目标信号和反馈信号的相关功能 …… 293
问题 9　怎样进行目标值给定？ …… 293
问题 10　反馈信号接到哪里？ …… 294
问题 11　怎样用键盘来预置目标值？ …… 295
问题 12　怎样确定目标值的大小？ …… 296
6.4　变频器的 PID 功能设置 …… 297
问题 13　怎样决定变频器的 PID 功能是否有效？ …… 297
问题 14　变频器的 PID 功能有效时，有哪些功能将发生变化？ …… 298
问题 15　反馈信号的滤波时间起什么作用？ …… 298
问题 16　PID 输出的滤波时间和反馈信号的滤波时间有什么区别？ …… 299
问题 17　如何处理反馈信号的断线故障？ …… 299
问题 18　变频器的 PID 功能有效时，有什么变化？ …… 300
问题 19　怎样预置和调整 P、I、D 等参数？ …… 300
6.5　PID 的控制运行 …… 301
问题 20　闭环控制时，PID 调节系统的工作过程是怎样的？ …… 301
问题 21　闭环控制时，频率显示总在变化是正常现象吗？ …… 302
问题 22　某料泵电动机采用了 PID 控制，但振荡范围大，怎么解决？ …… 302
问题 23　系统的压力变化后恢复得太慢，怎么办？ …… 302
问题 24　PID 控制系统在运行过程中，被控量有时会发生不规则的变化，怎么办？ …… 303
问题 25　闭环控制与开环控制在运行过程中能够互相切换么？ …… 303
6.6　闭环控制的起动问题 …… 304
问题 26　闭环控制系统在起动过程中为什么容易跳闸？ …… 304
问题 27　闭环控制时，怎样解决电动机的起动？ …… 304
6.7　外接 PID 控制器 …… 305
问题 28　外接 PID 控制器的大致构造如何？ …… 305

问题29　变频器中比例增益的含义和PID调节器有何区别？……… 306
问题30　外接PID控制器与变频器如何配合使用？………………… 307
问题31　有一台用于恒温控制的鼓风机，使用变频器的PID功能时，起动时常因过电流而跳闸，怎么办？……… 308
问题32　某车间供水系统，希望通过恒压供水来节能，须注意哪些问题？…………………………………………… 309
问题33　多台变频器同时控制时，为什么以采用外接PID控制器为宜？……………………………………… 310
问题34　怎样熟悉和调试变频调速的闭环系统？……………… 311
6.8　控制参数的选择 …………………………………………… 312
问题35　中央空调的冷却水循环系统的控制参数有几种？………… 312
问题36　中央空调的冷冻水系统的控制参数有几种？……………… 313
问题37　水源水位变化的控制参数有几种？……………………… 314
问题38　卷绕机械的恒张力控制的控制参数有几种？……………… 315
6.9　关于转速闭环控制 ………………………………………… 315
问题39　转速闭环控制和过程闭环控制有什么区别？……………… 315
问题40　转速闭环控制的作用是什么？…………………………… 316
问题41　转速闭环控制中的P、I、D和过程闭环控制有无区别？…………………………………………… 316
第7章　变频调速的应用基础 ………………………………… 318
7.1　电力拖动系统中的传动机构 ……………………………… 318
问题1　常见的传动机构有哪些？传动比怎样定义？ ……………… 318
问题2　经传动机构减速后，转矩为什么会增大？ ………………… 319
问题3　采用了传动机构后，转矩、转速为什么要折算？ ………… 320
问题4　怎样进行转矩、转速的折算？ …………………………… 321
问题5　某传输机采用变频调速时把传动比减小了一些，结果满载时电动机电流超过了额定值，发热严重。问题出在哪里？（实际最高工作频率为40Hz） ………… 321
问题6　某电动机带重物作圆周运动，如图7-4所示。运行到达A点后电动机开始过载，到达B点时容易堵转，怎样解决？（上限频率为45Hz） ………………………… 322
问题7　某恒转矩负载，电动机功率为22kW，额定转速为1470r/min，传动比$\lambda=4$，采用无反馈矢量控制变频调速，在最低工作频率（4Hz）时运行

不稳定，怎样解决？（满载运行频率范围为4～40Hz） ………………………………… 322
问题8　某带式输送机，原用三相换向器电动机，功率为7kW，实测最大电流为12A，最高运行转速为1200r/mm，调速范围 α_n =2；传动机构的齿轮箱传动比 λ =5。改用变频调速时，选用4极、5.5kW异步电动机，额定电流为11.6A，工作频率范围是21～42Hz。满载时实测电流为11.5A，但电动机温度偏高，如何改进？ ………… 323
问题9　某大惯性负载采用变频调速后，加速时间需预置到10s以上，起动时才不跳闸，希望能把起动过程缩短到6s以内，怎么解决？ ………… 324
7.2　变频调速系统必须满足的条件 ……………………………… 325
问题10　变频调速拖动系统必须满足哪些条件？ ……………… 325
问题11　某恒转矩负载，电动机数据是：75kW，139.7A，1480r/min，实际运行电流是133A，减速箱的传动比 λ =5，使用变频调速后，减速箱能否省去？ ……………………………………… 327
问题12　提升机电动机数据：30kW，56.8A，1470r/min。最大运行电流约为50A。现打算把工作频率提高为60Hz，行不行？ ………………………………… 328
问题13　某带式输送机，电动机数据是：15kW，30.3A，1460r/min，最大运行电流约为28A，减速箱的传动比 λ =10，打算把传动比减小为 λ =8，以提高生产率行不行？ ………………… 329
问题14　公司欲对升降机提速，电力拖动系统如图7-9所示。电动机参数：1.5kW、3.7A、4极、1400r/min。传动比：20。变频器配用电动机功率：2.2kW。 ………… 330
升降机概况：轿厢重约160kg，对重为100kg。楼面高4.5m，轿厢往返一次约10s，工作频率为52Hz，实测最大电流：3.1A.
要求轿厢往返一次缩短为8s，如何解决？
问题15　某排粉机原用三相换向器电动机，其数据：160/53.3kW，285/175A，1050/350r/min。改造为普通电动机变频调速，电动机数据：

160kW，275A，380V，1480r/min。在
转速为 1050r/min 时，电动机过载，电流
达 316A，是什么原因？ …… 333
7.3　恒转矩负载的变频调速 …… 334
问题 16　什么是恒转矩负载？主要特点是什么？ …… 334
问题 17　怎样选择恒转矩负载控制方式？ …… 335
问题 18　怎样预置恒转矩负载的加、减速时间？ …… 335
问题 19　恒转矩负载实现变频调速后，怎样
确保其转速的调节范围？ …… 336
问题 20　某重灰炉（用于粉末状物料的干燥）的炉体
要求重载起动，曾采用软起动器起动，十分
困难，只能减载起动，不符合工艺要求。如
采用变频器起动，能否起动起来？如工作频
率在 50Hz 左右，是否有节能的可能？ …… 337
电动机数据：$P_{MN}=250kW$；$n_{MN}=1480r/min$；$I_{MN}=461A$
运行电流 $I_M=380\sim440A$。
负载转速：$n_L=6r/min$。齿轮箱传动比：$\lambda=247$
问题 21　某恒转矩负载的电动机数据：30kW，1470r/min，
56.8A。采用变频调速后，常用频率为 20～30Hz，
最高频率为 50Hz。存在问题：(1) 起动困难；
(2) 低频运行过程中有时电流偏大，如何解决？ …… 338
问题 22　某恒转矩负载采用变频调速后，在运行过程中
负载稍有增加就容易堵转，怎么办？ …… 338
问题 23　透平压缩机的盘车电机，因负荷很大，难以起动，
电机参数如下：37kW、70A、1470r/min，
如何解决？ …… 339
问题 24　440V、60Hz 的电动机，配用 380V 的变频器，
可以吗？ …… 339
7.4　重力负载的变频调速 …… 340
问题 25　什么是重力负载？在变频调速时有些什么特点？ …… 340
问题 26　有一台向下传输石料的传输机，倾斜角约为 30°。
电动机数据：22kW，42.5A，1470r/min，改为
变频调速后，怎样计算制动电阻？ …… 341
问题 27　向下传输石料的传输机，变频器的工作怎样

与电磁制动器配合？ ········· 342
问题 28　起重机械进行变频调速时，怎样防止“溜钩”？ ········· 343
问题 29　怎样防止变频器跳闸时的溜钩或滑行？ ········· 344
7.5　恒功率负载的变频调速 ········· 347
问题 30　什么是恒功率负载？主要特点是什么？ ········· 347
问题 31　恒功率负载配用的电动机总要比负载所需功率大得多，为什么？ ········· 348
问题 32　怎样减小恒功率负载配用的电动机功率？ ········· 349
问题 33　变频调速的最大工作频率以多大为宜？ ········· 351
7.6　卷绕机械的恒张力控制 ········· 352
问题 34　磁粉离合器是怎样工作的？ ········· 352
问题 35　磁粉离合器怎样实现恒张力控制？ ········· 353
问题 36　什么是变频器的转矩控制功能？ ········· 353
问题 37　怎样利用转矩控制功能实现恒张力控制？ ········· 354
问题 38　怎样利用闭环控制实现恒张力控制？ ········· 355
7.7　金属切削机床的变频调速 ········· 356
问题 39　金属切削机床的机械特性是怎样的？ ········· 356
问题 40　金属切削机床对调速性能有些什么要求？ ········· 358
问题 41　金属切削机床实现变频调速时有哪些主要特点？ ········· 358
问题 42　某精密车床有 8 挡转速，分别是：75、120、200、300、500、800、1200、2000r/min，300r/min 为计算转速，电动机数据：2.2kW、1420r/min、5.0A，怎样实现变频调速？ ········· 359
问题 43　怎样计算低速挡的传动比？ ········· 360
问题 44　怎样计算高速挡的传动比？ ········· 360
问题 45　某立式车床用 Y-Δ 起动，起动和制动比较频繁，常烧接触器。想改为变频调速，须注意些什么？ ········· 360
问题 46　龙门刨床是怎样构成的？ ········· 361
问题 47　龙门刨床原来的直流拖动系统有什么特点？ ········· 362
问题 48　龙门刨床的刨台电动机改造成变频调速时，电动机功率能减小吗？ ········· 364
问题 49　在选择龙门刨床变频器时，需注意些什么？ ········· 364

问题50　龙门刨床刨台的往复周期是怎样的？ …… 364
问题51　龙门刨床的专用电子接近开关是如何构成的？ …… 366
问题52　龙门刨床的专用接近开关如何工作？ …… 366
问题53　怎样预置龙门刨床刨台的加、减速时间？ …… 367
问题54　怎样预置龙门刨床刨台的各挡转速？ …… 368
问题55　怎样选择龙门刨床变频器直流回路中的制动电阻？ …… 368
问题56　变频器跳闸时怎样防止龙门刨床刨台滑出？ …… 369
问题57　怎样改造龙门刨床中的抬刀电磁铁电路？ …… 370
7.8　印染机械的变频调速 …… 370
问题58　印染机械的工作特点如何？ …… 370
问题59　要实现6单元同步，须注意哪些问题？ …… 371
问题60　怎样知道布速是否同步？ …… 372
问题61　“明电”变频器的给定系统有什么特点？ …… 372
问题62　怎样预置各单元的偏置与增益？ …… 373
7.9　二次方律负载的变频调速 …… 374
问题63　什么是二次方律负载？主要特点是什么？ …… 374
问题64　二次方律负载在实现变频调速时，
工作频率能否超过额定频率？ …… 375
问题65　二次方律负载在实现变频调速时，
怎样预置加、减速时间？ …… 376
问题66　75kW的风机采用变频调速后，最大工作频率
约在45Hz以下，能否采用55kW的变频器？ …… 376
问题67　某55kW鼓风机实际工作时的运行频率在45Hz以下，
需要大风量时，切换至工频运行，能否选用45kW
的变频器？ …… 377
7.10　风机的变频调速 …… 378
问题68　110kW风机采用变频调速后由人工控制其风量，
主要预置哪些功能？ …… 378
问题69　某商场根据客流规律，要求排风扇在各时段的风量
如图7-49所示，如何控制（开机和关机由人工进
行，所购变频器是英威腾INVT-P9系列）？ …… 379
问题70　冷却水塔的风机在水温超过27℃时起动（运行
频率不低于25Hz），水温超过35℃时，运行频
率必须上升至50Hz，如何控制？ …… 381

7.11　水泵的变频调速 …… 383
问题 71　单台水泵开环控制时应预置哪些功能？…… 383
问题 72　恒压供水要达到什么目的？…… 383
问题 73　什么是睡眠与唤醒功能？…… 384
问题 74　“一变多泵”与“每台变频”各有什么优缺点？…… 386
问题 75　有一台 10kW 消防泵，平时用于供水约只需 2.2kW，能否配用容量较小的变频器？…… 386
问题 76　某车间供水系统共用三台水泵，两台 22kW，一台 7.5kW，小泵仅在高峰期作补充用，打算实行变频调速，如何安排？…… 386
问题 77　怎样实现浅水池的水位控制？…… 387
问题 78　怎样实现深水池的水位控制？…… 388
7.12　变频调速取代其他调速电动机 …… 391
问题 79　橡胶机械采用直流电动机可以起动，改造为变频调速时难以起动，为什么？…… 391
问题 80　上述问题，能解决吗？…… 392
问题 81　电磁调速电动机怎样实现变频调速？…… 393
问题 82　有一台机器，原来采用的是电磁调速电动机，最低速时能带动，改造为变频调速后，最低速时带不动，什么原因？怎么解决？…… 394
问题 83　变频调速取代三相换向器电动机时，应注意哪些问题？…… 396
7.13　特殊电动机的变频调速 …… 398
问题 84　电磁制动电动机怎样接线？…… 398
问题 85　电磁制动电动机实现变频调速有什么好处？…… 399
问题 86　电磁制动电动机怎样实现变频调速？…… 399
问题 87　直流制动能否代替电磁制动器？…… 400
问题 88　齿轮电动机怎样实现变频调速？…… 401
问题 89　潜水泵怎样实现变频调速？…… 402
问题 90　同步电动机怎样实现变频调速？…… 403
第 8 章　变频调速的经济效益 …… 405
8.1　节能的几个方面 …… 405
问题 1　空气压缩机实现变频调速后是怎样节能的？…… 405
问题 2　锅炉给水系统实现变频调速后是怎样节能的？…… 405

问题3　商场的电动扶梯实现变频调速后是怎样节能的？ …………… 406
问题4　为什么降低电力拖动系统的平均转速可以节能？ …………… 406
问题5　“大马拉小车”降压节能的实质是什么？ …………………… 407
问题6　实现变频调速是否一定能节能？ ………………………………… 409
问题7　异步电动机各部分功率与机械特性有什么联系？ …………… 409
问题8　为什么说变频调速最节能？ …………………………………… 410
问题9　为什么二次方律负载的节能效果最好？ ……………………… 414
问题10　变频器的功能预置对节能效果有影响吗？ ………………… 414
问题11　变频器中的“自动节能”功能是基于什么原理设置的？ ………………………………………………… 416
问题12　因为球磨机起动困难，电动机的功率往往偏大，采用变频调速后是否可以节能？ ………………………………… 417
问题13　上限频率偏低的变频调速系统是否有节能空间？ ………… 417
8.2　水泵运行的节能分析 ……………………………………………… 419
问题14　扬程是否就是上扬水的高度？ ……………………………… 419
问题15　为什么要实现恒压供水？ …………………………………… 419
问题16　节能效果主要体现在哪些部位？ …………………………… 420
问题17　怎样分析供水管路的工作状态？ …………………………… 421
问题18　怎样分析供水功率的节能效果？ …………………………… 423
问题19　从供水功率看，是否流量越小节能越多？ ………………… 424
问题20　从轴功率看，是否流量越小节能越多？ …………………… 425
问题21　水泵的轴功率与供水功率之间的差异在哪里？ …………… 425
问题22　怎样理解系统中的广义空载功率？ ………………………… 426
问题23　怎样分析供水管路中的广义空载功率？ …………………… 427
问题24　怎样分析取水泵站的广义空载功率？ ……………………… 428
问题25　怎样分析循环水系统中的广义空载功率？ ………………… 429
问题26　水位控制实现变频调速时也节能吗？ ……………………… 430
问题27　有三台水泵，平时两台工作，一台备用。若使用三台变频器运行比两台工频运行还节能，如何解释？ ………… 431
8.3　风机运行的节能分析 ……………………………………………… 432
问题28　怎样描绘风机的工作特点？ ………………………………… 432
问题29　某风机原来是全速运行的，欲改成变频调速，怎样分析其节能效果？ …………………………………………… 433
问题30　某风机原来用风门调节风量，欲改成变频调速，

节能效果如何？…… 434
问题31　某风机配用了变频器，绝大多数时间都只能在50Hz下运行，但电动机的裕量较大，50Hz时的负载率只有75%（β=0.75），能否使它节能？…… 434
8.4　充分利用拖动系统释放的能量 …… 436
问题32　拖动系统在哪些情况下会释放能量？…… 436
问题33　多台变频器共母线可以节能吗？…… 437
问题34　拖动系统释放的能量能否反馈到电源？…… 437
8.5　变频调速的经济效益 …… 438
问题35　怎样估价因减少故障率产生的经济效益？…… 438
问题36　采用变频调速后机械的寿命能提高吗？…… 438
问题37　变频调速能提高产品质量吗？…… 438
问题38　变频调速还有哪些经济效益？…… 439
问题39　怎样评估变频空调的经济效益？…… 439
第9章　变频器的保护功能与故障分析 …… 441
9.1　变频器的过载保护 …… 441
问题1　过载保护的对象是什么？…… 441
问题2　在哪些情况下电动机的过载是允许的？…… 441
问题3　变频器怎样判断电动机是否过载？…… 442
问题4　过载保护有什么特点？…… 443
问题5　变频器的热保护功能和热继电器有什么区别？…… 444
问题6　变频器输出电流过载一定是负载过重吗？…… 444
9.2　变频器的过电流保护 …… 444
问题7　“过电流保护”与“过载保护”有什么区别？…… 444
问题8　怎样判断变频器输出端的短路故障？…… 445
问题9　在哪些情况下可能导致变频器的逆变桥“直通”？…… 446
问题10　变频器的功能预置不当会形成过电流吗？…… 446
问题11　电动机在过载情况下有可能因过电流而跳闸吗？…… 447
问题12　怎样判断因变频器内部的检测异常而导致的过电流？…… 448
问题13　变频器一接通电源就“过电流”跳闸，是什么原因？…… 448
问题14　变频器在哪些情况下发生过电流可以不跳闸？…… 449
问题15　如果生产机械要求的加速时间很短，而电力拖动

系统的惯性又很大，怎么办？ …… 450
9.3　变频器的过电压和欠电压保护 …… 450
问题 16　导致变频器过电压的原因有哪些？ …… 450
问题 17　针对上述过电压原因，变频器可以采取哪些对策？ …… 451
问题 18　导致变频器欠电压的原因有哪些？ …… 452
问题 19　限流电阻损坏的原因有哪些？ …… 453
问题 20　变频器在切断电源后为什么显示“UL”（欠压）？ …… 454
问题 21　许多变频器对于直流电压的下限值定得很低，是什么原因？ …… 454
9.4　变频器跳闸后的重合闸功能 …… 455
问题 22　怎样使变频器的保护系统误动作时不停止工作？ …… 455
问题 23　多台变频器相互干扰怎么办？ …… 456
问题 24　车间内的大功率电动机起动时使变频器跳闸，怎么办？ …… 456
问题 25　电网短路或遇雷击时，电源电压突降，约 100ms 左右接触器未释放，但变频器却跳闸了，影响了生产，怎样解决？ …… 456
9.5　其他保护 …… 457
问题 26　变频器因“过热”跳闸的可能原因有哪些？ …… 457
问题 27　变频器主要有哪些薄弱环节？ …… 458
问题 28　变频调速系统中低压断路器跳闸是什么原因？ …… 458
9.6　变频调速系统的机械振动 …… 459
问题 29　怎样判断是否发生了机械谐振？ …… 459
问题 30　产生机械振动的可能原因有哪些？ …… 460
9.7　变频器的维修 …… 460
问题 31　怎样判断整流模块的好坏？ …… 460
问题 32　怎样判断 IGBT 管是否正常？ …… 461
问题 33　怎样判断逆变模块是否正常？ …… 461
问题 34　滤波电路中的均压电阻为什么会烧坏？ …… 462
问题 35　变频器面板操作正常，但外接控制不工作，是什么原因？ …… 463
9.8　变频器修复后的通电 …… 464
问题 36　变频器修复后通电时，如何防止因短路而损坏器件？ …… 464

问题 37　如果有一个 IGBT 因损坏而短路，如何找出？ …………… 464
问题 38　如果三相输出电压不平衡，是什么原因？ ………………… 465
问题 39　开关电源常见的故障有哪些？ ………………………………… 466
9.9　变频调速系统的特性试验 ……………………………………… 466
问题 40　电动机的特性试验需要哪些设备？ …………………………… 466
问题 41　怎样得到变频调速系统的机械特性？ ………………………… 467
问题 42　怎样得到负载变化时的电流曲线？ …………………………… 468
问题 43　怎样得到电流-电压曲线？ …………………………………… 469
第 10 章　异步电动机的基本原理 ………………………………… 470
10.1　异步电动机的结构与旋转原理 ……………………………… 470
问题 1　变频调速技术为什么主要应用于异步电动机？ …………… 470
问题 2　什么是旋转磁场？用什么方法可以得到旋转磁场？ ……… 470
问题 3　三相交流异步电动机内的旋转磁场是怎样产生的？ ……… 471
问题 4　两相交变电流的合成磁场也是旋转磁场吗？ ……………… 474
问题 5　三相旋转磁场和两相旋转磁场有什么区别？ ……………… 476
问题 6　异步电动机是怎样把电能转换成机械能的？ ……………… 477
问题 7　异步电动机为什么只能异步？ ……………………………… 478
问题 8　什么是主磁通和漏磁通？ …………………………………… 478
10.2　异步电动机的分析方法 ……………………………………… 478
问题 9　异步电动机为什么要用等效电路来分析？ ………………… 478
问题 10　定子的等效电路是怎样得出的？ …………………………… 479
问题 11　怎样从定子侧看能量的传递关系？ ………………………… 482
问题 12　怎样把旋转着的转子电路等效成静止的三相电路？ ……… 483
问题 13　怎样从转子侧看能量关系？ ………………………………… 485
问题 14　怎样绘出电动机的一相等效电路图？ ……………………… 486
问题 15　定子电流和转子电流之间有怎样的关系？ ………………… 487
问题 16　怎样绘出矢量图？ …………………………………………… 488
问题 17　简化等效电路是怎样得出的？ ……………………………… 489
问题 18　怎样看异步电动机的能量关系？ …………………………… 490
问题 19　异步电动机的电磁转矩与哪些因素有关？ ………………… 491
10.3　矢量和矢量控制 ……………………………………………… 492
问题 20　什么是空间矢量？什么是时间矢量？ ……………………… 492
问题 21　异步电动机有哪些空间矢量？ ……………………………… 493
问题 22　不同方式产生的旋转磁场之间能够等效变换吗？ ………… 495

问题23　异步电动机和直流电动机的主要区别在哪里？…… 495
问题24　什么是无反馈矢量控制？…… 496
问题25　采用了矢量控制的变频调速系统与直流电动机调速系统相比较，如何？…… 496
10.4　直接转矩控制 …… 498
问题26　直接转矩控制与矢量控制有哪些主要区别？…… 498
问题27　直接转矩控制是一种比矢量控制更为先进的控制方式吗？…… 499
问题28　哪些场合使用直接转矩控制更好？…… 500
第11章　电力电子器件 …… 501
11.1　电力电子器件在变频器中的作用 …… 501
问题1　交-直-交变频的框图是怎样的？…… 501
问题2　变频器是怎样把直流变成交流的？…… 501
问题3　变频器怎样实现变频又变压的？…… 503
问题4　什么是正弦波脉宽调制（SPWM）？…… 503
问题5　怎样实现SPWM？…… 504
问题6　什么是电流跟踪的PWM控制？…… 505
问题7　变频器对电力电子器件有些什么要求？…… 506
11.2　晶闸管（SCR） …… 507
问题8　晶闸管有哪些基本特点？…… 507
问题9　晶闸管在直流电路里的工作特点是怎样的？…… 508
问题10　晶闸管在交流电路里的工作特点是怎样的？…… 508
问题11　晶闸管有哪些主要参数？…… 509
问题12　晶闸管逆变电路有什么特点？…… 510
问题13　以晶闸管为逆变管的变频器有什么些特点？…… 510
11.3　电力晶体管（GTR或BJT） …… 511
问题14　电力晶体管与普通晶体管有什么区别？…… 511
问题15　电力晶体管的工作状态和普通晶体管相同吗？…… 512
问题16　GTR的主要参数有哪些？…… 513
问题17　GTR的基极驱动电路有什么特点？…… 514
问题18　GTR的缓冲电路起什么作用？…… 514
问题19　为什么GTR模块的额定功率比电压与电流的乘积小很多？…… 515
问题20　以GTR为逆变管的变频器有些什么特点？…… 515

问题 21　为什么电源停电时变频器中的 GTR 容易烧坏？ ………… 516
11.4　门极关断（GTO）晶闸管 ………………………………………… 517
问题 22　什么是门极关断晶闸管？ ……………………………… 517
问题 23　门极关断晶闸管的主要参数有哪些？ …………………… 518
问题 24　门极关断晶闸管的门极驱动电路有什么特点？ ………… 518
问题 25　门极关断晶闸管主要用于何种变频器？ ……………… 519
11.5　功率场效应晶体管（Power MOSFET） …………………………… 519
问题 26　功率场效应晶体管有哪些基本特点？ ………………… 519
问题 27　功率场效应晶体管有哪些主要参数？ ………………… 520
问题 28　功率场效应晶体管的驱动电路有什么特点？ ………… 520
问题 29　功率场效应晶体管变频器有什么特点？ ……………… 521
11.6　绝缘栅双极型晶体管（IGBT） …………………………………… 521
问题 30　IGBT 的基本特点有哪些？ ……………………………… 521
问题 31　IGBT 的主要参数有哪些？ ……………………………… 522
问题 32　以 IGBT 为逆变管的变频器有什么特点？ …………… 522
问题 33　智能功率模块（IPM）是怎样构成的？ ………………… 523
问题 34　智能功率模块有哪些主要优点？ ……………………… 524
问题 35　IGBT 在变频器中的主要运行数据有哪些？ ………… 525
问题 36　为什么温度偏高时变频器还可以降额使用？ ………… 525
问题 37　栅极电阻的大小对 IGBT 的工作有什么影响？ ……… 526
问题 38　IGBT 的缓冲电路和 GTR 的相同吗？ ………………… 527
11.7　IGBT 的驱动电路 ……………………………………………… 528
问题 39　IGBT 对驱动电路有什么要求？ ……………………… 528
问题 40　驱动电路的基本构成是怎样的？ ……………………… 528
问题 41　驱动电压不足会产生什么后果？ ……………………… 529
问题 42　驱动模块还需要放大吗？ ……………………………… 530
问题 43　驱动电路怎样进行过电流保护？ ……………………… 531
问题 44　驱动电路的供电电源有什么特点？ …………………… 532
问题 45　怎样检查驱动模块是否正常？ ………………………… 532
问题 46　怎样检查驱动模块的带负载能力？ …………………… 533

第 1 章　变频器的内部电路及工作特点

1.1　变频器的整流与滤波电路

问题 1　交-直-交是什么意思?

中小容量的低压变频器基本上都采用“交-直-交”变频方式，其主电路的框图如图 1-1 所示。

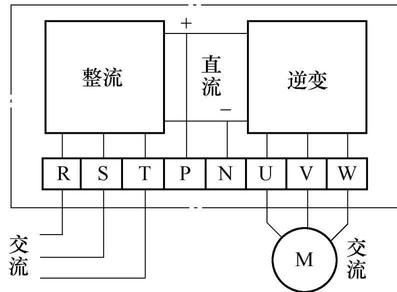


图 1-1　“交-直-交”变频框图

变频器在 R、S、T 端输入频率固定的三相交流电，首先经全波整流电路整流成直流电。然后又经逆变电路“逆变”成频率和电压任意可调的三相交流电，从 U、V、W 端输出，作为三相异步电动机的变频电源。

可见，在变频器的输入和输出之间，经历了“交流-直流-交流”的过程，故称为“交-直-交”变频。

问题 2　电压型和电流型变频器的主要特点是什么?

变频器根据直流电路中滤波方式的不同，分为电压型和电流型两种。

1. 电压型　直流电路采用电容器滤波。在波峰（电压较高）时，由电容器储存电场能，在波谷（电压较低）时，电容器将释放电场能来进行补充，从而使直流电压保持平稳。直流电路是一个电压源，故称为电压型，如图 1-2a 所示。

2. 电流型　直流电路采用电抗器滤波。在波峰（电流较大）时，由电抗器储存磁场能，在波谷（电流较小）时，电抗器将释放磁场能来进行补充，从而使直流电流保持平稳。直流电路是一个电流源，故称为电流型，如图 1-2b 所示。

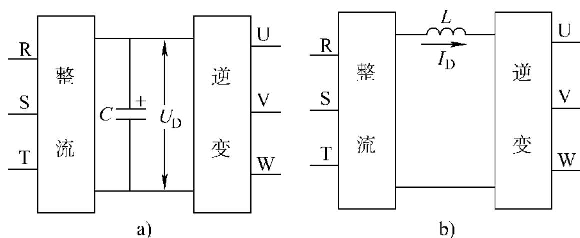


图 1-2　电压型和电流型变频器

a）电压型　b）电流型

问题 3　变频器的内部主电路是怎样构成的？

1. 基本结构　电压型“交-直-交”变频器的主电路由整流和逆变两大部分组成，如图 1-3 所示。

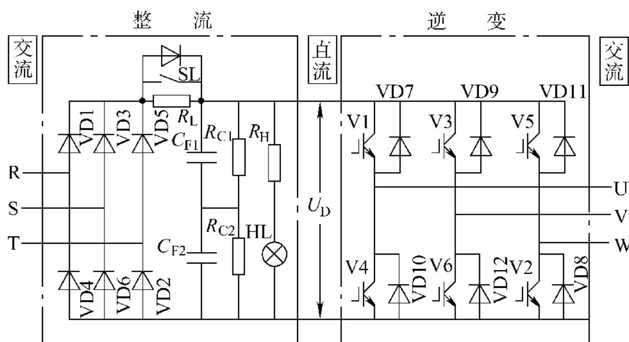


图 1-3　电压型“交-直-交”变频器的主电路

2. 整流和滤波　从 R、S、T 端输入频率固定的三相交变电源，经三相整流桥（由二极管 VD1 ~ VD6 构成）全波整流成直流电，电压为 U_D。

电容器 C_{F1} 和 C_{F2} 为滤波电容器，减小直流回路的电压纹波。

3. 逆变　6 个 IGBT（绝缘栅双极型晶体管）V1 ~ V6 构成三相逆变桥，把直流电“逆变”成频率和电压任意可调的三相交流电，从 U、V、W 端输出。

问题 4　和滤波电容器并联的电阻起什么作用?

迄今为止，电解电容器的耐压只能做到 500V。而三相 380V 的电源电压经全波整流后，直流电压的峰值为 537V，平均值也有 513V。因此，滤波电容器只能由两个（或两组）电解电容器串联而成。为了增大电容量，改善滤波效果，变频器内总是先将若干个电解电容器并联成一组，然后再将两组电容器（C_{F1} 和 C_{F2}）串联起来，如图 1-4 所示。

但由于每个电容器的电容量不可能绝对相同，尤其是电解电容器，其电容量的离散性较大，若干个并联以后，两组电容器的电容量之间的差异是比较明显的。串联以后，两个电容器组上的电压分配必将是不均衡的。这将导致两组电容器寿命的不一致。

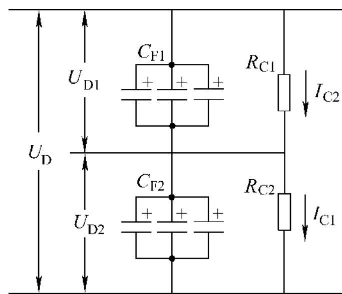


图 1-4　变频器的滤波电路

解决电压不均衡的方法便是在两个电容器组的两端分别并联电阻值相等的均压电阻 R_{C1} 和 R_{C2}，如图 1-4 所示。均压的原理如下：

假设：$C_{F1} < C_{F2}$

则

$$U_{D1} > U_{D2}$$

这将导致：$I_{C2} > I_{C1}$

式中　C_{F1}、C_{F2}——两个电容器组的电容量（μF）；

U_{D1}、U_{D2}——两个电容器组两端的电压（V）；

I_{C1}、I_{C2}——两个电容器组的充电电流（A）。

就是说，C_{F2} 上的充电电流较大，从而使 U_{D2} 有所提高，使 U_{D1} 和 U_{D2} 趋于均衡。

由于电阻的阻值容易做得比较准确，从而保证了均压效果。

问题 5　整流桥和滤波电容器之间为什么要接一个电阻和接触器（或晶闸管）?

我们通过对高、低压整流滤波电路进行比较来说明。

1. 接通电源时的共同特点　当变频器刚接通电源（接触器 KM1 动作）时，滤波电容器上的电压为 0V，而电源电压为 380V，振幅值

为 537V，且为了提高滤波效果，滤波电容器的电容量又很大，所以在刚接通电源的瞬间，必将：

（1）产生很大的冲击电流；

（2）使电源电压瞬间下降为 0V，形成了对网络的干扰。

以上两点，高、低压整流滤波电路都是相同的。

2. 高、低压电路的不同点　在低压整流滤波电路中：

（1）变压器的二次绕组，能够把合闸时的冲击电流限制在允许范围内；

（2）变压器的二次电压虽然瞬间为 0V，但一次电压所受影响不大，如图 1-5a 所示。

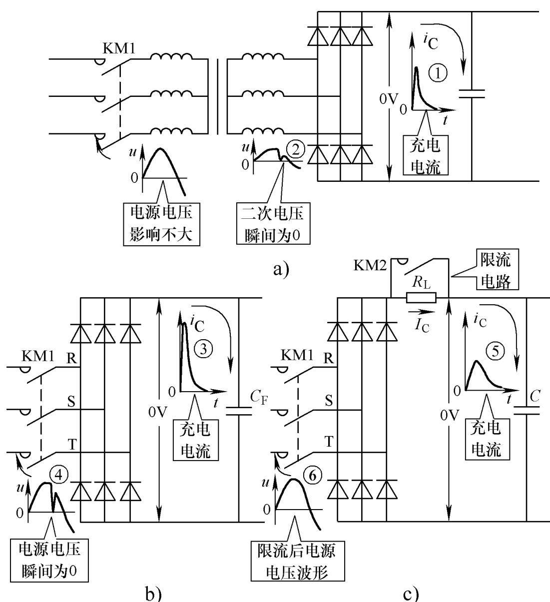


图 1-5　限流电阻的作用

a）低压电路　b）高压无限流电阻　c）高压有限流电阻

但在高压整流滤波电路中，因为没有变压器的阻隔，所以：

（1）合闸时的冲击电流足以损坏整流管。

（2）电源电压瞬间降为 0V，将对其他设备的正常运行形成干扰，如图 1-5b 所示。

3. 解决办法　在三相整流桥和滤波电容器之间，接入限流电阻 R_L，不但把滤波电容器的充电电流限制在一个允许范围内，而且电源电压也不会降至 0V，如图 1-5c 所示。

但 R_L 如长期接在电路内，将影响直流电压和变频器输出电压的大小。因此，当滤波电容器已经充电完毕后，由接触器 KM2（或晶闸管）将 R_L 短接。

问题 6　限流电阻烧坏了怎么配？

1. 限流电阻的阻值　原则上可根据变频器的额定电流来选择。例如，变频器的额定电流为 10A，则限流电阻的阻值应为

$R_L \geqslant 537/10\Omega = 53.7\Omega$

实际上，并不需要计算，常采用：

对于容量较小变频器取 $R_L = 50 \sim 100\Omega$；

对于容量较大变频器取 $R_L = 10 \sim 40\Omega$。

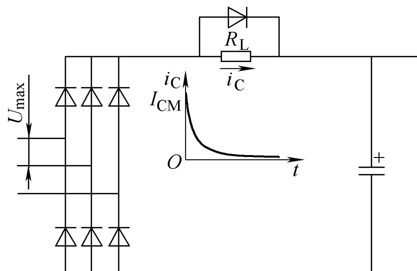


图 1-6　限流电阻中的充电电流

2. 限流电阻的功率　限流电阻中的充电电流是衰减得很快的，如图 1-6 所示。并且，很快被开关器件所短路，通电的时间很短。因此，限流电阻的功率不必太大。通常取

$$P_{RL} \geqslant 50 \sim 100\text{W}$$

即已足够。电阻值大者取小值；电阻值小者取大值。

1.2　变频器的逆变电路

问题 7　直流电是怎样变成交流电的？

单相逆变桥的结构和原理如图 1-7a 所示。图中，V1、V2、V3、V4 为开关器件，组成单相逆变桥，接至直流电源 P（+）与 N（-）之间，电压为 U_D；Z_L 为负载。

逆变电路的工作情况如下：

（1）前半周期　令 V1、V2 导通；V3、V4 截止，则负载 Z_L 中的电流从 a 流向 b，Z_L 上得到的电压是 a“+”、b“-”，设这时的电压为“+”。

（2）后半周期　令 V1、V2 截止；V3、V4 导通，则负载 Z_L 中的电流从 b 流向 a，Z_L 上得到的电压是 a“－”、b“＋”，这时的电压为“－”。

上述两种状态如能不断地反复交替进行，则负载 Z_L 上所得到的便是交变电压了，如图 1-7b 所示。这就是由直流电变为交流电的“逆变”过程。

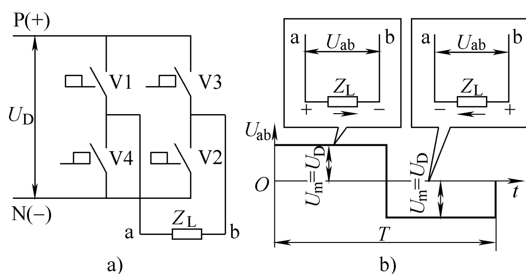


图 1-7　单相逆变桥及其工作过程

a）单相逆变桥的构成　b）工作过程

三相逆变桥的电路结构如图 1-8a 所示。其工作过程与单相逆变桥相同，只要使三个桥臂的交替工作之间，互差三分之一周期（$T/3$），从而使三相输出电压的相位之间互差 $2\pi/3$ 电角度就可以了，如图 1-8b 所示。

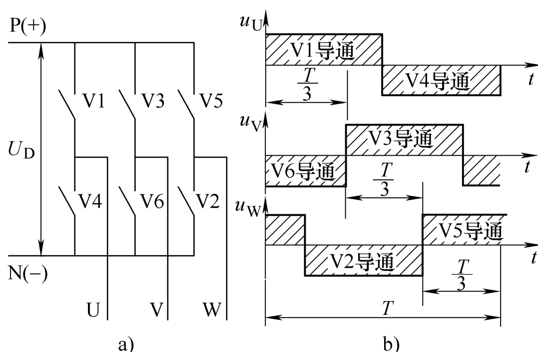


图 1-8　三相逆变桥及其工作波形

a）三相逆变桥的构成　b）三相逆变桥的输出电压

低压变频器中的开关器件普遍采用绝缘栅双极型晶体管（IGBT），如图 1-9 所示。

问题 8　IGBT 有什么特点？

IGBT 也叫绝缘栅双极型晶体管，它是晶体管和绝缘栅场效应晶体管的组合，如图 1-9 所示，其中

图 1-9a 是晶体管，它的三个极分别是集电极 C、发射极 E 和基极 B。它的特点是集电极电流 I_C 的大小取决于基极电流 I_B，故称为电流控制型器件。

图 1-9b 是绝缘栅场效应晶体管,它的三个极分别是漏极 D、源极 S 和栅极 G。栅极和源极之间是绝缘的。它的工作特点是漏极电流 I_D 的大小取决于栅极和源极之间的电压 u_{GS},故称为电压控制型器件。

图 1-9c 所示即为 IGBT，它的主体部分和晶体管相同，也是集电极 C 和发射极 E；控制部分却是绝缘栅结构，通常称为栅极 G。集电极电流 I_C 的大小取决于栅极与发射极之间的电压 u_{GE}。所以，它也是电压控制型器件。

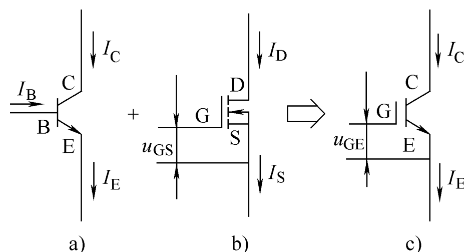


图 1-9　IGBT 的构成

a）晶体管　b）场效应管　c）IGBT

问题 9　为什么每个逆变管旁边都要反并联二极管？

逆变桥中，每个逆变管旁边，都要反并联一个二极管，如图 1-7 中的 VD1 和 VD4 所示。以一个桥臂为例，对它们的作用说明如下：

异步电动机的定子电路是感性电路，其电流的变化滞后于电压，如图 1-10 右上角波形所示。图中：

$0\sim t_1$ 段：电流 i 与电压 u 的方向相反，是绕组的自感电动势（即反电动势）克服电源电压在作功（磁场作功）。这时的电流将通

过反并联二极管流往直流回路，向滤波电容器充电。如果没有反并联二极管，则因为逆变管只能单方向导通，这段时间内的电流无回路可流通，电流的波形将发生畸变。

$t_1 \sim t_2$：电流 i 与电压 u 的方向相同，是电源电压克服绕组的自感电动势在作功（电源作功）。这时的电流是滤波电容器向电动机放电的电流。

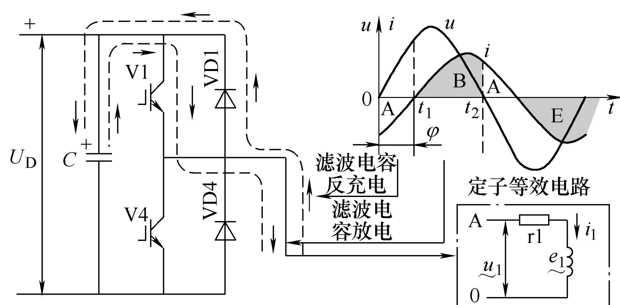


图1-10　逆变桥反并联二极管的作用

如果没有反并联二极管，则因为逆变管只能单方向导通，绕组的磁场无法与电源（变频器中为直流电路）交换能量，电路的工作将发生畸变。

问题10　变频器的主电路有哪些接线端子？

主电路接线端子的排列大致如图1-11a所示。说明如下：

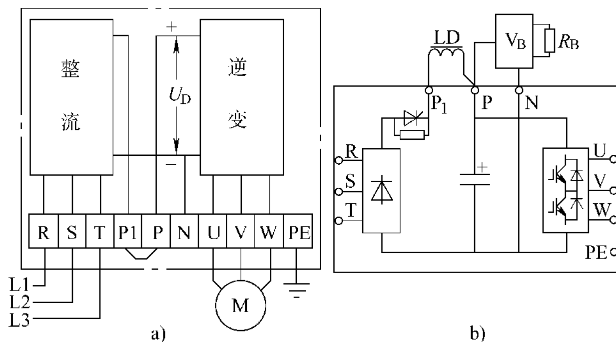


图1-11　主电路的端子安排

a）主电路的接线端子　b）与原理图的对照

（1）R、S、T 为变频器的输入端子，接至电源；

（2）U、V、W 为变频器的输出端子，接至电动机；

（3）P、N 为滤波后直流电路的 +、－端子；

（4）P_1 为整流桥输出的 + 端,出厂时 P_1 端与 P 端之间用一铜片短接。在需要接入直流电抗器 LD 时,拆去铜片,将 LD 接在 P_1 和 P 之间。

（5）PE 为接地端。

图 1-11b 所示是接入直流电抗器和制动单元、制动电阻的情形。

问题 11　为什么变频器的输入和输出端绝对不允许接反？

变频器的输入端和输出端之间是绝对不允许接错的。万一将电源进线错误地接到了变频器的输出（U、V、W）端，则不管哪个逆变管导通，都将引起两相间的短路而将逆变管迅速烧坏。

如图 1-12 所示，假设在某一瞬间，电源的 R 端为“+”，而 S 端为“－”，则在逆变管 V3 导通的瞬间，电流将经 VD1 和 V3 而短路。V3 将立即烧坏。由于六个逆变管以极高的频率（载波频率）不断地交替导通着，而变频器从跳闸到切断电源是需要时间的。所以，六个逆变管将很快地全部损坏。

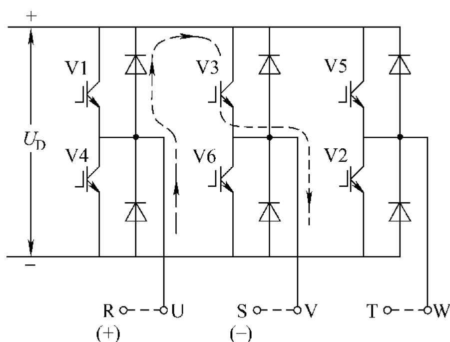


图 1-12　电源接错的后果

1.3　变频器内的各部分电流

问题 12　变频器的输出电流和频率有关吗？

作为一个电力拖动系统，当它以某一转速稳定运行时，电动机产生的电磁转矩 T_M 和负载的阻转矩 T_L 之间永远是互相平衡的，即

$$T_M = T_0 + T_L \approx T_L \tag{1-1}$$

式中　T_{M}——电动机的电磁转矩（N · m）；

T_0——损耗转矩（N · m）；

T_{L}——负载的阻转矩（N · m）。

式（1-1）所示的关系是不随频率而变的。

电动机电磁转矩的大小是和转子电流与磁通的乘积成正比的，即

$$T_{\mathrm{M}}=K_{\mathrm{T}}I_2'\Phi_1\cos\varphi_2 \tag{1-2}$$

式中　K_{T}——转矩系数；

I_2'——转子电流的折算值（A）；

Φ_1——主磁通（Wb）；

$\cos\varphi_2$——转子的功率因数。

结合式（1-1）和式（1-2）可知：

$$I_2'=T_{\mathrm{M}}/K_{\mathrm{T}}\Phi_1\cos\varphi_2\approx T_{\mathrm{L}}/K_{\mathrm{T}}\Phi_1\cos\varphi_2 \tag{1-3}$$

式（1-3）表明，因为磁通是保持不变的，所以，转子电流和负载的阻转矩成正比，定子电流是随转子电流而变的（详见第 10 章），故电动机运行电流的大小，主要和负载的阻转矩有关。在负载的阻转矩不变的情况下，工作频率不论是 50Hz 还是 25Hz，电流大小基本上是相等的，如图 1-13 所示。就是说，变频器的输出电流是和频率无关的。

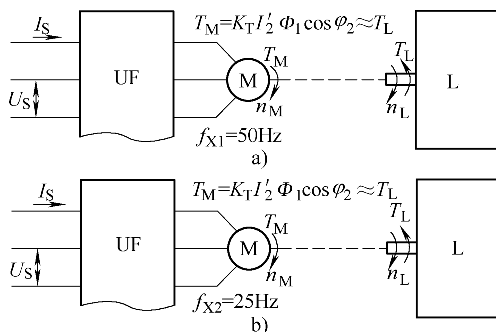


图 1-13　变频器的输出电流

a）50Hz 时的输出电流　b）25Hz 时的输出电流

问题 13　风机和水泵随着频率的下降，电流也减小是什么原因？

风机和水泵被称为二次方律负载，其阻转矩的大小和转速之间的

关系如图 1-14 所示，转速越低，阻转矩越小。

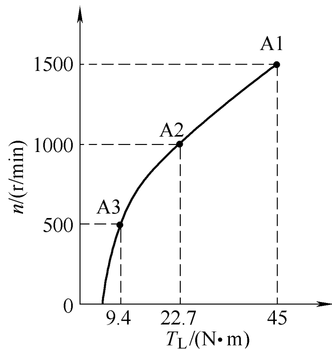


图 1-14　二次方律负载特性

当电动机的工作频率下降时，因为阻转矩大幅下降，所以运行电流也随之减小。从根本上说，变频器输出电流的大小，仍然是取决于负载阻转矩的。

问题 14　变频器的输入电流常常小于输出电流，是什么原因？

因为变频器输出电压的高低是要随频率而变的。频率下降时，输出电压也降低（详见第 2 章）。根据能量守恒原理，在低频运行时，变频器输出侧的电压低、电流大；而输入侧则电压高而电流小。这个特点和变压器是相同的，只是在变频器里，输出电压的降低是和频率相联系的。

问题 15　变频器各部分电流之间的关系怎样？

图 1-15 是变频调速系统的示意图。由图可知：

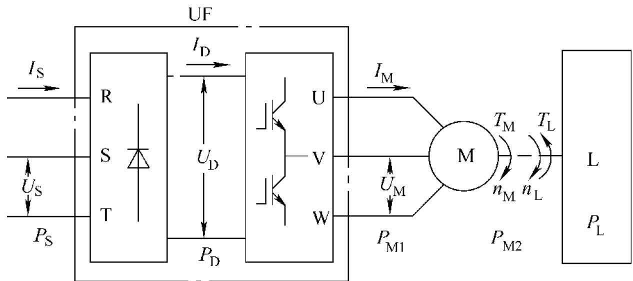


图 1-15　变频器各部分的电流

1. 各部分的功率

（1）变频器的输入功率

$$P_S = \sqrt{3}U_S I_S \lambda \times 10^{-3} \qquad (1\text{-}4)$$

式中 P_S——变频器的输入功率（kW）；

U_S——电源线电压（V）；

I_S——电源线电流（A）；

λ——输入电路功率因数，其含义详见后述。

（2）直流回路功率

$$P_D = U_D I_D \times 10^{-3} \qquad (1\text{-}5)$$

式中 P_D——直流回路的功率（kW）；

U_D——直流回路电压（V）；

I_D——直流回路电流（A）。

（3）变频器的输出功率　也是电动机的输入功率，计算如下：

$$P_{M1} = \sqrt{3}U_M I_M \cos\varphi_1 \times 10^{-3} \qquad (1\text{-}6)$$

式中 P_{M1}——变频器的输出功率（kW）；

U_M——变频器的输出线电压，也是电动机的输入线电压（V）；

I_M——变频器的输出线电流，也是电动机的输入线电流（A）；

$\cos\varphi_1$——电动机定子侧的功率因数。

（4）电动机轴上的输出功率

$$P_{M2} = \frac{T_M n_M}{9550} \qquad (1\text{-}7)$$

式中 P_{M2}——电动机轴上的输出功率（kW）；

T_M——电动机的转矩（N · m）；

n_M——电动机的转速（r/min）。

2. 频率下降后各部分的功率

（1）电动机的输出功率

假设：负载是恒转矩的，即负载阻转矩的大小与转速高低无关：

$$T_L = \text{const}$$

则由式（1-7）可知，当电动机的转速因频率下降而下降时，电动机的输出功率也必下降：

$$P_{M2}=\left[\frac{T_M n_M(\downarrow)}{9550}\right]\downarrow$$

（2）其他各部分的功率　根据能量守恒的原理，在各部分的功率损耗忽略不计的情况下，有

$$P_S \approx P_D \approx P_{M1} \approx P_{M2} \tag{1-8}$$

式（1-8）是分析各部分电流大小的理论基础。

当频率下降时：

$$P_{M2}\downarrow \rightarrow P_{M1}\downarrow \rightarrow P_D\downarrow \rightarrow P_S\downarrow$$

3. 频率下降后各部分电流

（1）电动机的电流（即变频器的输出电流）如上所述，变频器的输出电流与频率无关，即

$$I_M \approx \text{const}$$

在这里，P_{M1}的下降是因为变频器的输出电压 U_M 是随频率下降而下降的结果，即

$$P_{M1}=[\sqrt{3}U_M(\downarrow)I_M\cos\varphi_1]\downarrow$$

（2）直流电流　在直流回路里，电压 U_D 是不变的，但功率 P_D 减小了，所以频率下降时，电流 I_D 将减小，即

$$I_D=\left[\frac{P_D(\downarrow)}{U_D}\right]\downarrow$$

（3）输入电流　变频器输入侧的电源电压 U_S 也是不变的，但输入功率 P_S 减小了，所以频率下降时，电流 I_S 也将减小，即

$$I_S=\left[\frac{P_S(\downarrow)}{\sqrt{3}U_S\cos\varphi_1}\right]\downarrow$$

问题 16　变频器的三相输入电流不平衡是正常现象吗?

变频器在低频运行时，三相输入电流容易不平衡，这是正常的。

要说明这个问题，首先看一下三相整流桥向电阻性负载供电时的情形。

变频器输入的三相电压经全波整流后的电压波形具有 6 个脉波，如图 1-16 所示。

每个脉波的上升沿都要轮流地向滤波电容器充电，充电过程是有序的。

在每个脉波的下降沿，实际上是滤波电容器向负载放电的过程。

因为电阻值是常数，所以每个脉波的放电电流都是相等的。或者说，放电的“机会”是均等的。

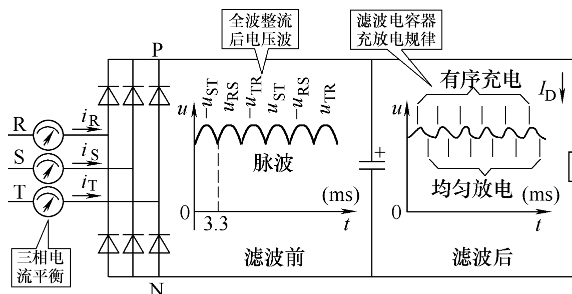


图 1-16　三相整流桥向电阻负载供电

所以，当三相整流桥的负载为电阻性时，滤波电容器的充、放电过程具有“有序充电、均等放电”的特点。在这种情况下的三相输入电流是平衡的。

再看变频器的情形。

因为逆变桥的负载是电动机，属于电感性负载。如问题 7 中所述，负载也要向滤波电容器充放电，并且由于逆变桥的输出频率是随意的，和输入侧的电流频率不相等，两者对滤波电容器充放电的步调不一致。例如，当输出频率为 25Hz 时，电流比电压滞后的时间为 7. 5ms，如图 1-17 所示。就是说，在 7. 5ms 的时间段内，负载在向电容器充电。而三相全波整流后，每个脉波的时间只有 3. 3ms，于是 6 个脉波向滤波电容器充电的有序性被破坏了。

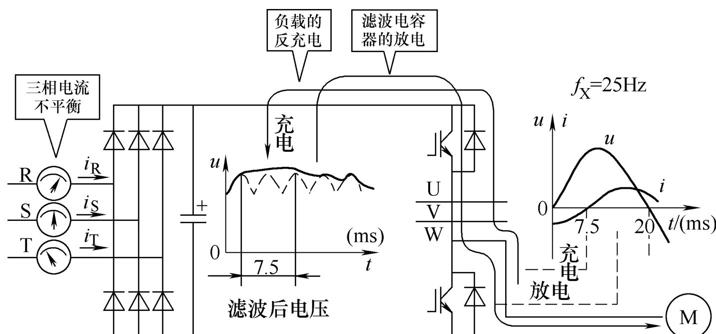


图 1-17　变频器内的充、放电情形

再看放电，滤波电容器向电动机的放电电流是正弦电流，是由小逐渐增大的。因此，6 个脉波的放电电流是各不相同的。就是说，放电的均等性也被破坏了。

总之，6 个脉波的充电既不有序，放电也不均等，所以三相输入电流是不平衡的，并且哪相电流大，哪相电流小，是随变频器输出频率的大小以及负载的轻重而变的，并无规律。

1.4　变频器控制电路中常见的电子器件

问题 17　晶体管放大电路有哪些特点?

晶体管由集电极 C、发射极 E 和基极 B 构成，如图 1-18 所示。晶体管放大电路的基本特点是集电极电流的大小取决于基极电流：

$$I_C = \beta I_B \tag{1-9}$$

式中　I_C——集电极电流（mA）；

β——电流放大倍数；

I_B——基极电流（mA）。

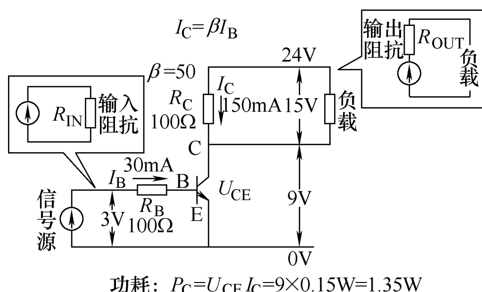


图 1-18　晶体管放大电路

在图中，由信号源和晶体管的 B-E 结构成信号输入电路，基极电阻 R_B 和 B-E 结是信号源的“外电路”，其等效电阻称为输入阻抗，用 R_{IN}表示。

集电极电流 I_C 在电阻 R_C 上的电压降 I_CR_C 就是被放大了的电压信号，是输出电路的信号源，和负载电阻一起，构成输出电路，而相对于负载所呈现的电阻，相当于输出信号源的内阻，称为输出阻抗，用 R_{OUT}表示。

集电极 C 和发射极 E 之间的电压降 U_{CE} 称为管压降，U_{CE} 和集电极电流 I_C 的乘积称为晶体管的功耗：

$$P_C = U_{CE} I_C \tag{1-10}$$

式中　P_C——晶体管的功耗（W）；

U_{CE}——晶体管的管压降（V）。

问题 18　晶体管的射极跟随电路有哪些特点？

射极跟随电路就是从发射极取出输出信号的电路，如图 1-19 所示。它的输出信号 U_E 从发射极电阻 R_E 上取出，U_E 的大小略小于基极电压 U_B，两者近乎相等，故称为射极跟随电路。

射极跟随电路的主要特点有：

（1）其电压放大倍数近似为 1（略小于 1）；

（2）输出阻抗小，相当于输出信号的内阻，所以带负载能力强；

（3）输入阻抗大，从信号源输入的电流小，取用的输入功率小。

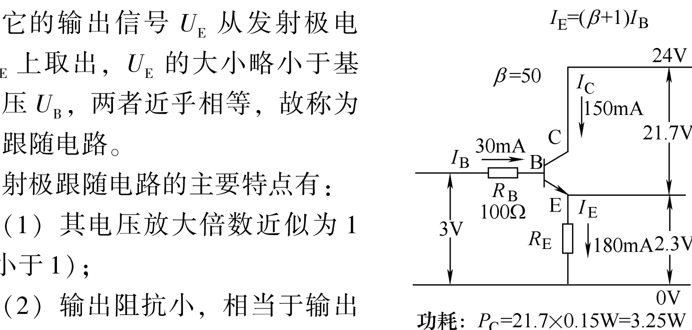


图 1-19　射极跟随电路

问题 19　晶体管有几种基本工作状态？

晶体管有三种基本工作状态，如图 1-20 所示，主要数据已在图中标出。现分述如下：

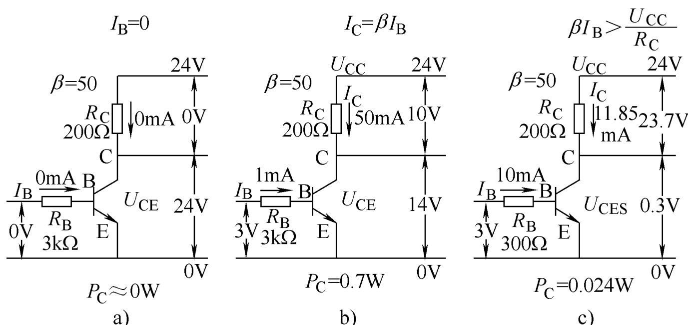


图 1-20　晶体管的基本工作状态

a）截止状态　b）放大状态　c）饱和状态

1. 截止状态　当基极电流等于 0 时，集电极只有一点漏电流，接近于 0mA，C、E 间的管压降 U_{CE} 接近于电源电压，功耗也接近于 0W，如图 1-20a 所示。

2. 放大状态　假设晶体管的电流放大倍数 $\beta=50$，则当基极电流增加为 1mA 时，集电极电流为

$$I_C=\beta I_B=50\times1\text{mA}=50\text{mA}$$

电阻 R_C 上的电压降为

$$U_{OUT}=I_CR_C=0.05\times200\text{V}=10\text{V}$$

C、E 间的管压降为

$$U_{CE}=U_{CC}-U_{OUT}=(24-10)\text{V}=14\text{V}$$

晶体管的功耗为

$$P_C=U_{CE}I_C=14\times0.05\text{W}=0.7\text{W}=700\text{mW}$$

如图 1-20b 所示。

3. 饱和状态　如图 1-20c 所示，如果把基极电流增大为 10mA，则经过电流放大后，集电极电流为

$$\beta I_B=50\times10\text{mA}=500\text{mA}$$

然而，根据欧姆定律，集电极电路里的最大电流只有

$$\frac{U_{CC}}{R_C}=\frac{24}{200}\text{A}=0.12\text{A}=120\text{mA}$$

就是说，晶体管的放大作用要受到欧姆定律的制约，当 $\beta I_B>U_{CC}/R_C$ 时，晶体管将失去放大作用而进入饱和状态。这时：

C、E 间的管压降 U_{CE} 约为 0.3V，故实际的集电极电流为 118.5mA。

晶体管的功耗为

$$P_C=U_{CE}I_C=0.3\times0.1185\text{W}=0.035\text{W}=35\text{mW}$$

需要特别注意的是，在晶体管的三种状态中，放大状态的功耗最大。

问题 20　运算放大器有些什么特点？

运算放大器是一种集成电路，如图 1-21 所示。S+和 S-分别接正、负电源。

信号输入的“-”端为反相端，当输入信号 U_I 从反相端输入时，输出信号 U_O 与 U_I 的相位相反。即，如果 U_I 为“+”，则 U_O 为“-”。信

号输入的“+”端为同相端，当输入信号 U_I 从同相端输入时，输出信号 U_O 与 U_I 的相位相同。即，如果 U_I 为“+”，则 U_O 也为“+”。

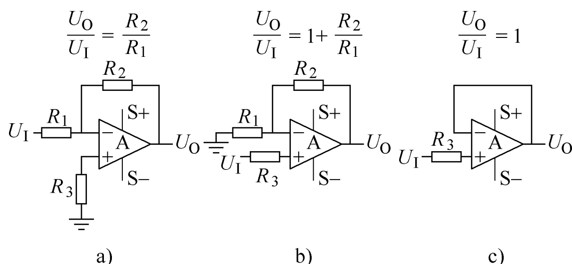


图 1-21 运算放大器基本电路

a）反相放大器 b）正相放大器 c）电压跟随器

运算放大器的基本接法有三种，分述如下：

1. 反相放大器 接法如图 1-21a 所示，其特点是：

（1）放大倍数

$$K_A=\frac{U_O}{U_I}=\frac{R_2}{R_1} \tag{1-11}$$

式中 K_A——放大倍数；

U_O——输出的电压信号（V）；

U_I——输入的电压信号（V）；

R_2——反馈电阻（Ω）；

R_1——输入电阻（Ω）。

（2）输入阻抗等于 R_1，放大倍数不宜过高。

（3）输出阻抗小，带负载能力较强。

2. 同相放大器 接法如图 1-21b 所示，其特点是：

（1）放大倍数

$$K_A=\frac{U_O}{U_I}=1+\frac{R_2}{R_1} \tag{1-12}$$

（2）输入阻抗大。

（3）输出阻抗小，带负载能力较强。

3. 电压跟随器 接法如图 1-21c 所示，其特点是：

放大倍数等于 1，故具有电压跟随的作用，它与晶体管的电压跟随器功能相同，但优于晶体管的电压跟随器。

问题 21　精密整流电路的特点是什么?

精密整流电路用于对微弱信号（<0.7V）的整流，在变频器控制电路里用得较多。其电路结构如图 1-22 所示。

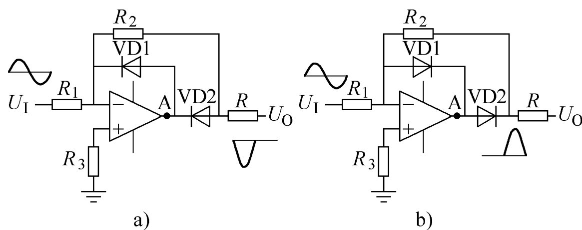


图 1-22　精密整流电路

a）正半周　b）负半周

图 1-22a 是正半周的整流电路。当输入信号 U_I 为“+”时，输出端的电位 U_A 为“-”，VD1 截止，而 VD2 导通，则有

$$\frac{U_O}{U_I} = -\frac{R_2}{R_1}$$

当输入信号 U_I 为“-”时，输出端的电位 U_A 为“+”，VD1 导通，而 VD2 截止，则有

$$U_O = 0V$$

图 1-22b 是负半周的整流电路。当输入信号 U_I 为“+”时，输出端的电位 U_A 为“-”，VD1 导通，而 VD2 截止，则有

$$U_O = 0V$$

当输入信号 U_I 为“-”时，输出端的电位 U_A 为“+”，VD1 截止，而 VD2 导通，则有

$$\frac{U_O}{U_I} = -\frac{R_2}{R_1}$$

上述电路中，因为 A 点的电位是已经被放大了的，所以输入信号再小，也能够进行整流，故称为精密整流。

问题 22　光耦合器的工作特点如何?

光耦合器是一种“光-电-光”转换器件，把电流信号通入发光器（LED），又由受光器（光敏半导体管）转换成电流信号输出，如图 1-23a 中的 PC 所示。

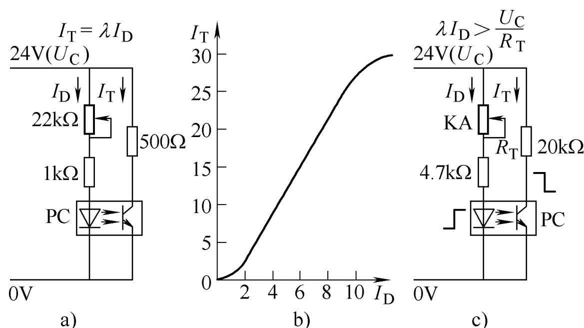


图 1-23　光耦合器
a）测试电路　b）传输特性　c）开关特性

光耦合器的传输性能用传输比 λ 来表示：

$$\lambda=\frac{I_T}{I_D}\times 100\% \tag{1-13}$$

式中　λ——传输比；

I_T——输出侧电流（mA）；

I_D——输入侧电流（mA）。

图 1-23b 是光耦合器的传输特性。由图可以看出，在大部分区间，传输特性是线性的。也有全部呈线性的，称为线性光耦合器。

光耦合器也可作开关器件用，如图 1-23c 所示，受光器饱和的条件是

$$\lambda I_D>\frac{U_C}{R_T}$$

问题 23　可控稳压管的特点是什么？

可控稳压管的图形符号如图 1-24a 所示，它有三个接线端：正极 K、负极 A 和控制端 C。

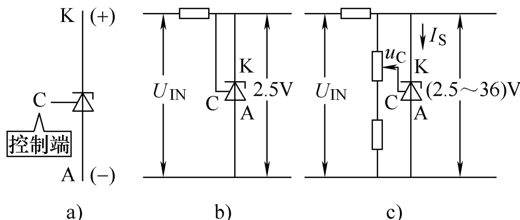


图 1-24　可控稳压管
a）图形符号　b）固定输出　c）可控输出

以 TL431 稳压管为例，当 C 极和 K 极相接时，则无论输入电压 U_{IN} 如何变化，K、A 间的输出电压总是稳定在 2.5V，如图 1-24b 所示。如果通过电位器改变 C 极的电位 u_C，则 K、A 间的稳定电压可以在（2.5～36）V 之间进行调节，如图 1-24c 所示。

从另一个角度看，如果输入电压 U_{IN} 不变，则改变 u_C 的大小，实际上也改变了稳压管吸收电流 I_S。u_C 越低，输出电压越高，I_S 越小。

问题 24　什么是霍尔效应？

把半导体芯片置于磁场的作用下，在一个方向上通入激励电流 I_H，则在其垂直方向上将感应出与磁场强弱成正比的电动势 U_H，称为霍尔电压或霍尔电动势。这种现象，称为霍尔效应，如图 1-25a 所示。

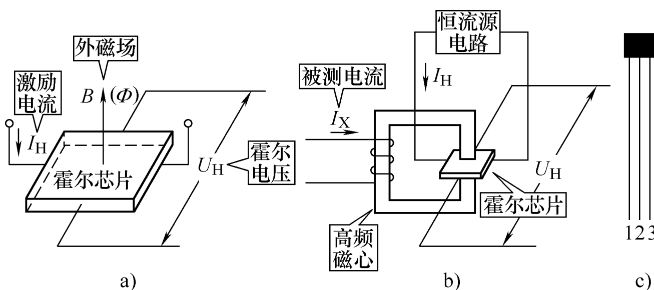


图 1-25　霍尔效应

a）霍尔效应　b）霍尔效应应用　c）霍尔芯片

利用霍尔效应，可以很方便地测量电流。把一个线圈缠绕在高频磁心上，高频磁心的一侧开一个口，把霍尔芯片镶嵌在里面，将被测电流通入线圈，则被测电流 I_X 的大小，将决定高频磁心里磁场的大小，也就决定了霍尔芯片感应出的霍尔电压 U_H 的大小，如图 1-25b 所示。

常见的霍尔芯片有三个引脚，如图 1-25c 所示。

问题 25　霍尔传感器是怎样构成的？

霍尔传感器必须有一个稳定的激励电流 I_H。因为霍尔芯片自身的电阻 R_H 是很小的，所以，只要在直流稳压电路中串联一个大电阻 R_1（$R_1 >> R_H$），就可以得到稳定的激励电流（见图 1-26a）：

$$I_H = \frac{U_B}{R_1 + R_H} \approx U_B / R_1 = C \qquad (1\text{-}14)$$

实际应用的霍尔传感器常常做成集成电路，如图 1-26b 所示。

当被测电流很大时，也可将导线穿过磁心，如图 1-26c 所示。

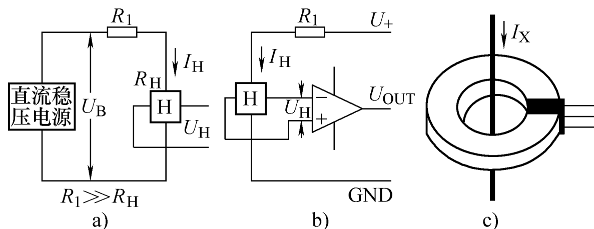


图 1-26　霍尔传感器

a）霍尔传感器　b）集成霍尔传感器　c）大电流测量

1.5　变频器控制电路的开关电源

问题 26　变频器的控制框图是怎样的?

图 1-27 所示是变频器的大致控制框图，其主要部件是以计算机的中央处理器（CPU）为核心的主控电路，其主要功能有：

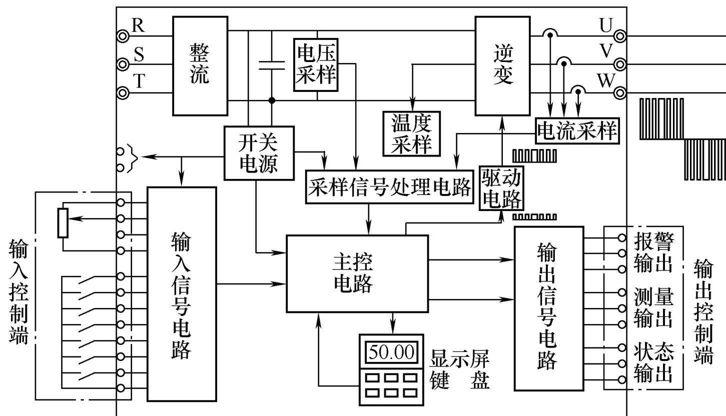


图 1-27　变频器的控制框图

接收从键盘和外部输入电路发出的频率给定信号和操作指令，进行各种运算后，产生正弦脉宽调制脉冲波，输出给驱动电路；

接收各种采样信号，和基准信号进行比较，判断是否正常或是否需要进行保护；

将变频器的运行状态和相关数据输出到输出信号电路。

问题 27　什么是开关电源？

用一个开关 SW，令它快速地进行通、断交替，把直流电压变换成高频方波电压，施加到变压器的一次侧，如图 1-28b 所示。

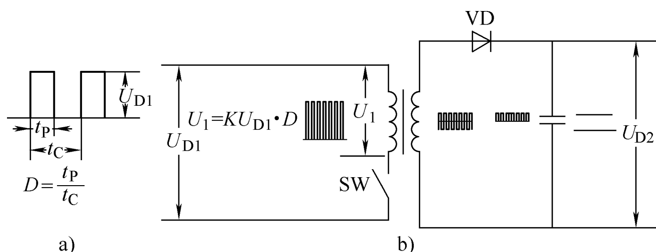


图 1-28　开关电源的原理

a）占空比定义　b）开关电源原理

方波电压的脉冲宽度与脉冲周期之比，称为脉冲的占空比，如图 1-28a 所示：

$$D=\frac{t_P}{t_C} \tag{1-15}$$

式中　D——占空比；

t_P——脉冲宽度（μs）；

t_C——脉冲周期（μs）。

则变压器一次侧得到的平均电压与直流电压和占空比的乘积成正比：

$$U_1=KU_{D1}D \tag{1-16}$$

式中　U_1——变压器一次平均电压（V）；

U_{D1}——直流电压（V）；

K——比例系数。

变压器二次电压取决于变压器的电压比（匝数比）：

$$U_2=kU_1 \tag{1-17}$$

式中　U_2——变压器的二次平均电压（V）；

k——变压器的电压比。

开关电源中所用的高频变压器，称为脉冲变压器。其结构如图 1-29a 所示。变压器的磁路由高频磁心构成，不但磁导率高，且体积小、重量轻。

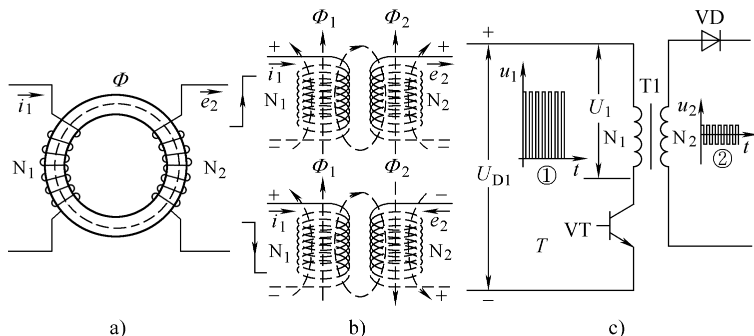


图 1-29　脉冲变压器

a）脉冲变压器　b）二次电动势　c）一、二次方电压

脉冲变压器的工作特点如下：

（1）当输入脉冲上升，磁通增加时，二次绕组的感应电流必阻碍磁通的增加，二次磁通的方向和一次磁通穿过二次绕组的磁通方向相反，如图 b 的上方所示，由此判断二次电压的极性是上“+”、下“-”；

（2）当输入脉冲下降，磁通减少时，二次绕组的感应电流必阻碍磁通的减少，二次电流磁通的方向和一次磁通穿过二次绕组的磁通方向相同，如图 1-29b 下方所示，由此判断二次电压的极性是上“-”、下“+”。

所以，尽管一次电压是单极性的，如图 1-29c 中的①所示，但二次电压却是交变的，如图 c 中的②所示。

因为二次电压是交变的高频脉冲波，所以要得到直流电压，须进行半波整流。又因为频率很高，可达数十千赫，故在要求不很高的场合，滤波也可以只用电容器滤波就可以了。

问题 28　开关电源怎样稳压？

部分变频器里的开关电源常常直接把主电路的直流电压作为高频

变压器的一次电压，而主电路的直流电压是时刻在波动的。这是因为：

（1）滤波简单　变频器主电路中直流回路的滤波，只能是简单的电容器滤波，其效果并不理想。

（2）电动机的负载波动　变频器的输出电流是随电动机负载的轻重而变化的，所以在电动机的负载波动时，直流电压也将波动。

（3）再生电压的影响　电动机在运行过程中，常常会处于再生状态。电动机再生的电流将向直流回路充电，使直流电压升高。

另一方面，开关电源的输出电压又要求十分稳定。具体方法如图 1-30a 所示，把高频变压器的输出电压反馈给 PWM 发生器。当电压偏低时，加大占空比；反之，当电压偏高时，减小占空比，如图 1-30b 所示，使输入电压的平均值维持不变，从而输出电压保持恒定。

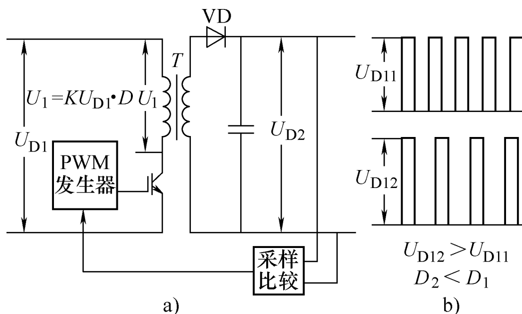


图 1-30　开关电源的稳压原理

a）稳压电路　b）输入电压波形

问题 29　开关电源有些什么优点？

图 1-31a 是稳压管稳压电路。其主要缺点是：

（1）必须用变压器降压，体积大，重量重；

（2）U_{D1}必须高于U_{D2}，两者之间由电阻R_S降压，在R_S上消耗功率。

图 1-31b 所示是晶体管串联型稳压电路，其主要缺点是：

（1）也要用变压器降压，体积大，重量重；

（2）U_{D1}也必须高于U_{D2}，两者之间由晶体管 VT 降压，VT 工作在放大状态，如上所述，晶体管在放大状态时，功耗是比较大的。

图 1-31c 所示是开关电源。因为使用了高频脉冲变压器，故体积小、重量轻；此外，用于调节 PWM 波形的晶体管 VT 处于开关状态，功耗较小。

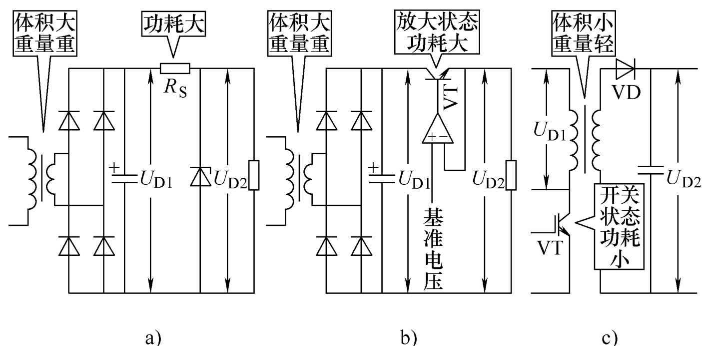


图 1-31 开关电源的优点
a）稳压管电路 b）晶体管串联型稳压电路 c）开关电源

问题 30 变频器从哪里向开关电源提供电源?

主要有两种方式:

1. 直流回路供电 从变频器内部的直流回路向开关电源提供电源，如图 1-32a 所示。从电路上说，这种方式比较简单，但必须在变频器接通电源后，开关电源才开始工作。

2. 单独供电 从主接触器 KM 的前面通过变压器向开关电源供电，如图 1-32b 所示。这种方式的开关电源比变频器先得电，可以使控制电路事先做好准备工作后再让变频器通电。

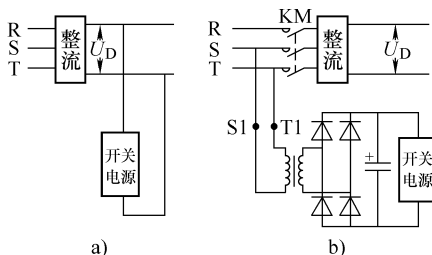


图 1-32 变频器开关电源的“源”
a）直流电路提供 b）单独提供

问题 31　变频器开关电源有多少低压绕组?

在图 1-33 中，除了 W1 是高压绕组外，其余都是低压绕组，它们是：

1. PWM 自激电源　如图中的 W2，用于为 PWM 发生器提供电源。

2. 5V 电源　如图中的 W3，用于为 CPU 提供 5V 电源，是控制电路中对稳定度要求最高的电源，所以采用 π 形滤波。受控电压的采样电压也由此取出。就是说，控制电压是否稳定主要看 5V 电压。

3. ±15V 电源　如图中的 W4 和 W5，主要用于为频率给定电路提供电源。

4. 24V 电源　各种变频器一般都为用户提供 24V 电源，以便用作传感器或低压控制电路的电源。

5. 驱动电源　驱动电源又分两种情况：

（1）上臂驱动电源　因为逆变桥上桥臂的三个逆变管分别和输出的 U、V、W 相连接，故三个电源必须隔离，相互间是绝缘的，如图中的 W7、W8 和 W9 所示。

（2）下臂驱动电源　因为逆变桥下桥臂的三个逆变管的发射极都和直流电路的负端 N 相接，故可以共用一个电源，如图中的 W10 所示。

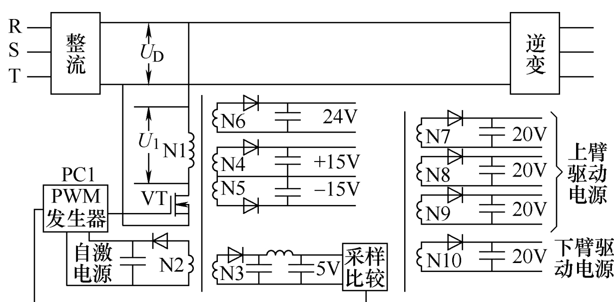


图 1-33　变频器开关电源的低压绕组

问题 32　采用分立元器件构成的开关电源怎样工作?

采用分立元器件构成的开关电源如图 1-34 所示。

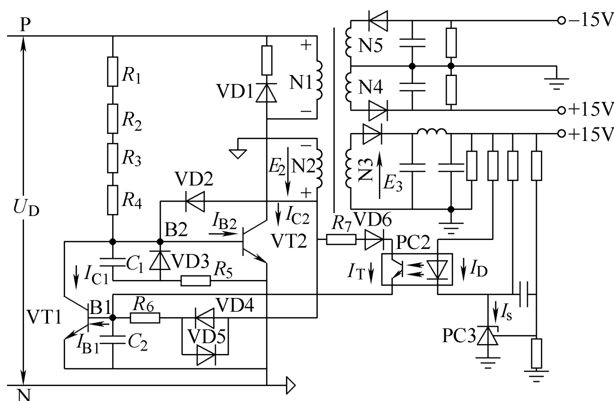


图 1-34　采用分立元器件构成的开关电源

VT2 是用作开关的，它的基本过程就是饱和导通和截止的交替过程。VT1 是用来控制 VT2 的截止的。

开关电源的工作过程如下：

1. VT2 的导通　当变频器通电，直流回路有电压 U_D 时，通过 $R_1 \sim R_4$，向 C_1 充电，并向 VT2 注入基极电流 I_{B2}，VT2 开始导通，变压器的一次绕组 W1 里的电流 I_{C2} 开始增大，二次绕组 W2 产生感应电动势 E_2，并产生强烈的正反馈过程：

E_2 通过 VD2 施加到 VT2 的基极 B2

$\rightarrow I_{B2}\uparrow \rightarrow I_{C2}\uparrow \rightarrow E_2\uparrow \rightarrow$直至 VT2 饱和导通。

2. VT2 的截止　当 I_{C2} 增大的同时：

一方面，E_2 通过 VD4 和 R_6 向 C_2 充电；

另一方面，二次绕组 W3 也产生感应电动势 E_3，经整流、滤波后得到 5V 电源，可调稳压管 PC3 通过电流 I_S，光耦合器 PC2 就有输入电流 I_D，其输出电流 I_T 也向电容器 C_2 充电，晶体管 VT1 导通并饱和，使 VT2 截止，并使 C_1 放电。

其后，重复上述过程，得到系列脉冲。

3. 稳压过程　假设 5V 电压偏高，则 $I_S\uparrow \rightarrow I_D\uparrow \rightarrow I_T\uparrow \rightarrow C_2$ 充电加快，加速 VT2 的截止，使 W1 上的输入脉冲变窄，W3 的感应电动势 E_3 减小。

问题 33　采用振荡芯片构成的开关电源怎样工作？

以 3844 振荡芯片为例，如图 1-35 所示，说明如下：

1. 振荡芯片的激励　变频器接通电源后，直流电压 U_D 通过 R_1 和 R_2 施加于振荡芯片 PC1 的⑦脚和⑤脚之间，使 PC1 开始振荡，⑥脚开始有脉冲输出，并驱动开关管 VT 的栅极，脉冲变压器的一次绕组 W1 得到脉冲电流。

2. 开关电源的自供电　一次绕组 W1 得到脉冲电流后，二次绕组 W2 产生感应电动势，经二极管 VD2 和 VD3 整流后向⑦脚供电。就是说，当芯片振荡起来后，芯片的电源主要由 W2 自己提供，W2 称为自供电绕组。

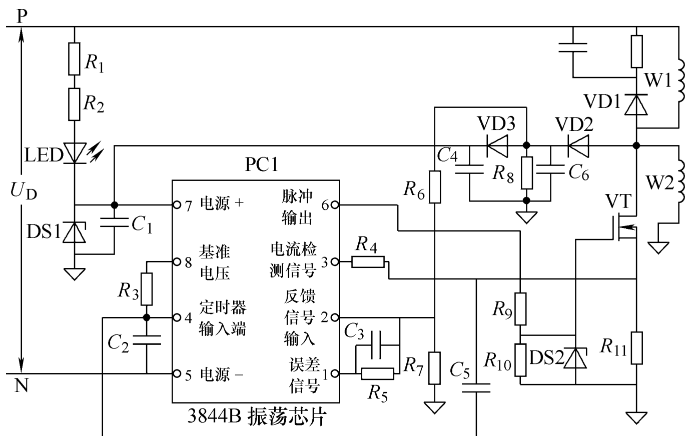


图 1-35　采用振荡芯片构成的开关电源

3. 主要引脚的功能

⑦脚和⑤脚：输入电源端，最大输入电压为 30V，通常为 20V 左右；

⑧脚：输出 5V 基准电压端，其温度稳定性好，常用来为反馈网络和 *RC* 振荡回路提供稳定的电压。

④脚：定时器输入端，外接的 R_3 和 C_2 电路和内部电路配合，产生能进行脉宽调制（PWM）的振荡脉冲。

②脚：反馈信号输入端，用于调整 PWM 脉冲的占空比。

③脚：电流检测信号的输入端，以便进行过电流保护。

①脚：反馈信号和基准信号比较并放大后的输出误差信号端。①脚和②脚之间由 C_3、R_5 构成的反馈网络，可以稳定比较放大器的带宽频率和放大倍数。

⑥脚：PWM 脉冲序列的输出端。

问题 34　采用振荡芯片构成的开关电源怎样稳压？

如图 1-36 所示，反馈信号从 +5V 电源处取出，因为 +5V 是提供给 CPU 的，对稳压的要求最高。

反馈网络由高精度可控稳压管 PC3 和光耦合器 PC2 构成。

稳压过程如下：

假设 +5V 电压偏高，则：

→可控稳压管电流 I_S↑

→光耦合器的 I_D↑

→光耦合器的 I_T↑

→②脚的反馈信号↑

→PWM 脉冲序列的占空比↓

→W1 的平均电压↓→ +5V 电压↓，得到调整。

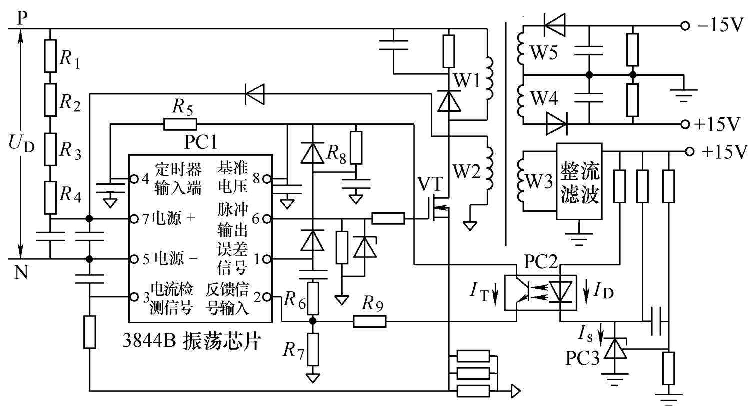


图 1-36　采用振荡芯片的稳压电路

问题 35　大容量变频器的开关电源有什么特点？

如图 1-37 所示，主要特点有：

（1）因为开关电源的容量较大，故在一次绕组电路里，用两个

功率场效应晶体管 VT1 和 VT2 串联，以降低它们的耐压和加大允许电流（额定电流大者，耐压较低）。

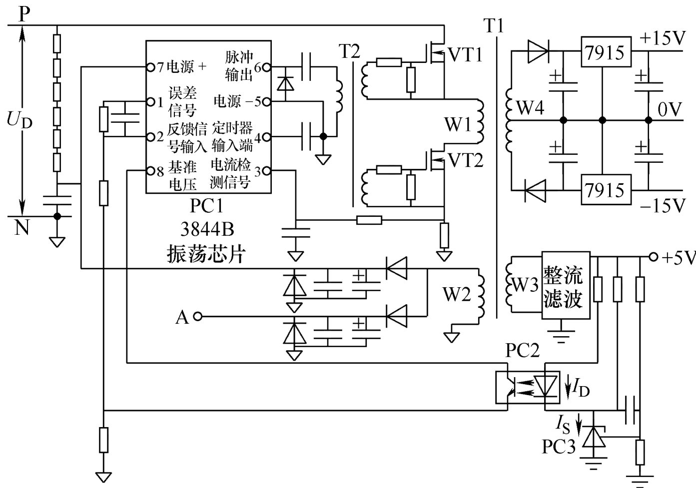


图 1-37　大容量变频器的开关电源

（2）增加一个小变压器 T2，其一次绕组接受振荡芯片输出的 PWM 脉冲序列，两个二次绕组则分别向 VT1 和 VT2 的栅极供电。

（3）二次绕组 W2 用于自供电；反馈网络也从 +5V 电源取出信号。

（4）±15V 电源由稳压集成电路 7815 和 7915 稳压后得到，用于主控板的供电。

1.6　CPU 的外围电路

问题 36　CPU 的时钟电路是怎样的？

CPU 也叫中央处理器，是计算机的核心部件。计算机在执行指令或进行运算时，是一个节拍、一个节拍，按部就班地进行的。时钟电路就是用来产生“节拍”（时钟脉冲）的，通常采用品质因数很高的由石英晶体构成的晶体振荡电路。

石英晶体由夹持在两个金属膜中间的的石英晶体片构成，如图 1-38a 所示。其固有振荡频率很高，可达 20MHz。

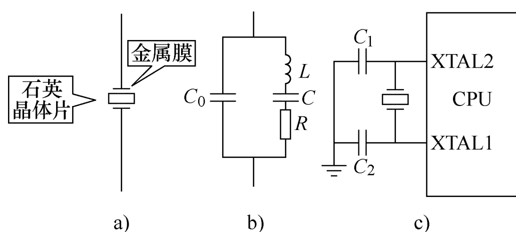


图 1-38　CPU 的晶体振荡电路

a）石英晶体　b）等效电路　c）与 CPU 相接

石英晶体的等效电路如图 1-38b 所示，通常 C 约为 0.1pF，C_0 约为 22pF，L 约为（1～100）mH，R 约为 100Ω。

石英晶体和 CPU 相接的电路如图 1-38c 所示，C_1、C_2 约为 30pF。和 CPU 内部的放大器构成振荡电路，产生晶体振荡脉冲，经分频后得到时钟脉冲。

问题 37　CPU 的复位电路是怎样构成的?

复位电路的作用是使 CPU 初始化，清除程序计数器和指令寄存器的内容，为重新开始运行作准备。CPU 在接通电源时，都首先要进行一次复位，称为上电复位。

复位电路分两种：

1. 高电平复位　CPU 中复位端的符号是 RST，如图 1-39a 所示。外部电路实际上是电容器的充电电路。通电后，因为电容器两端的电压不能突变，A 点为高电位，CPU 复位。当电容器充电完毕后，A 点为低电位，复位结束。

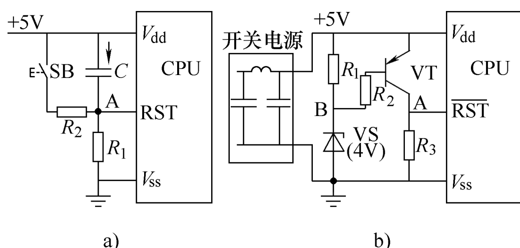


图 1-39　CPU 的复位电路

a）高电平有效　b）低电平有效

2. 低电平复位　CPU 中复位端的符号是$\overline{RST}$，如图 1-39b 所示。上电后，开关电源的滤波电容上的电压是逐渐上升的，当 B 点电位低于 4V 时，稳压管 VS 无电流，晶体管 VT 处于截止状态，$U_A=0V$，$\overline{RST}$为低电位，CPU 复位。当电源电压上升到大于 4V 时，VS 有电流，VT 饱和导通，$U_A\approx5V$，复位结束。

问题 38　CPU 怎样接收外部的模拟量信号?

模拟量输入信号主要是频率给定信号，或者是 PID 控制时的目标信号和反馈信号的输入端。它可以是电压信号，也可以是电流信号，如图 1-40 所示。现分别说明如下：

1. 电压输入信号　首先把“跳线选择”置于“V”位，即接收电压信号。因为输入信号的范围大多是 0～10V，而 CPU 接收的电压范围是 0～5V。所以，首先要通过 R_1 和 R_2 对输入电压进行分压，并由 VD1 和 VD2 钳位，将电压限制在 0～5V 范围内。再经运算放大器 A1 进行功率放大后输入给 CPU。

2. 电流输入信号　当跳线选择为电流输入信号时，将使 R_3 和 R_4 并联，它们的合成电阻等于 250Ω。当输入电流为 20mA 时，所得电压正好是 5V，其后的电路与电压信号输入时相同。

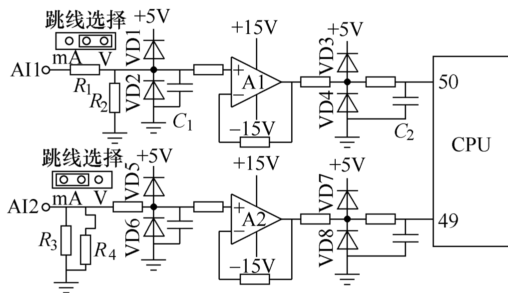


图 1-40　模拟量信号的接受电路

问题 39　CPU 怎样接收外部的开关量信号?

变频器可以从外部输入控制端输入各种指令，这些输入端输入的都是开关量指令，如图 1-41a 所示。CPU 的接收电路如图 1-41b 所示。当外部指令继电器 KA 的触点断开时，光耦合管的二极管部分无电流，光敏晶体管处于截止状态，A 点为高电平，CPU 未得到输入信号。

当 KA 闭合时，光耦合器有电流，光敏晶体管部分饱和导通，A 点降为低电平，CPU 得到有效信号，如图 1-41b 所示。

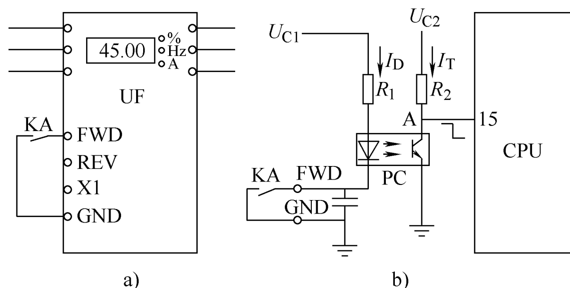


图 1-41 开关量信号的接收电路

a）变频器输入端 b）开关量输入电路

问题 40 CPU 怎样输出模拟量信号？

变频器输出的模拟量信号，主要是向外部仪表提供测量信号，如变频器的运行频率等。大多数变频器提供的都是与被测参数成正比的 0～10V 直流电压信号，如图 1-42a 所示。而 CPU 输出的则是经 PWM 控制后的脉冲序列，脉冲的振幅值是 5V。

对于 CPU 输出的“运行频率”信号，首先要进行放大，然后经 *R*、*C* 滤波后得到与变频器的输出频率对应的 0～+10V 直流电压信号，如图 1-42b 所示。

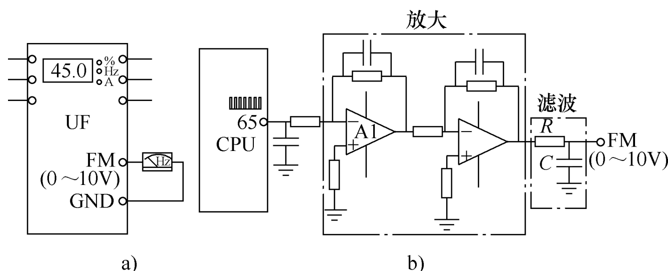


图 1-42 CPU 输出模拟量

a）变频器输出端 b）模拟量输出电路

问题 41 CPU 怎样输出开关量信号？

变频器的开关量输出有两种情形：继电器输出和晶体管输出，如图 1-43a 所示，分别说明如下：

1. 继电器输出　当 CPU 有信号输出（如在②脚）时，晶体管 VT1 饱和导通，输出继电器 KA 得电，其触点动作：常闭触点（PB—PA）断开，常开触点（PB—PC）闭合，如图 1-43b 所示。

2. 晶体管输出　当 CPU 有信号输出（如在㉔脚）时，晶体管 VT2 饱和导通，外部低压直流电路就可以用来进行各种控制。

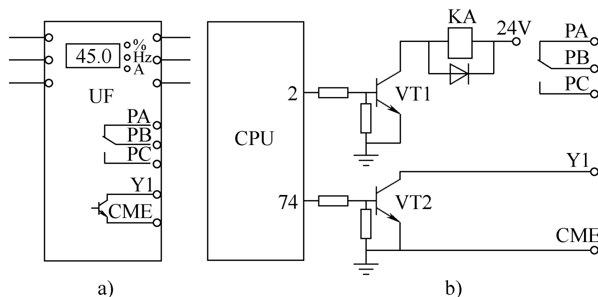


图 1-43　CPU 输出开关量

a）变频器输出端　b）开关量输出电路

问题 42　CPU 怎样控制显示屏？

迄今为止，多数变频器的显示屏都由分段式发光二极管数码显示器（简称 LED 数码管）构成。它由 7 个笔段构成。7 个笔段分别标以 A、B、C、D、E、F、G，小数点为 DP，如图 1-44a 所示。其基本电路通常接成共阳极或共阴极电路，如图 1-44b 所示是共阳极电路。图 1-44c 所示是 CPU 控制数码管的电路，数码管的电源由外部 5V 电源通过晶体管 VT 提供，VT 受 CPU 的控制。7 个笔段分别由 CPU 的㉛～㊳脚进行控制。

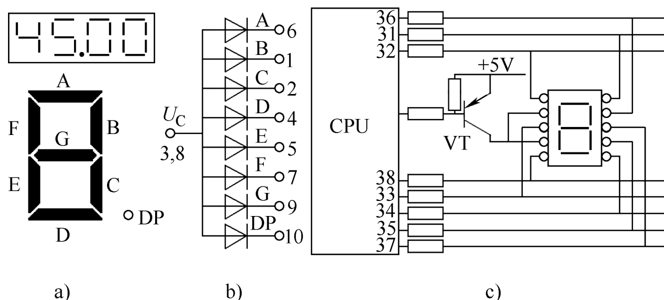


图 1-44　变频器的显示电路

a）LED 数码管　b）7 段数码管电路　c）变频器显示电路

1.7　变频器的电流采样电路

问题 43　能否从直流回路取出电流信号?

从直流回路取出电流信号的电路如图 1-45 所示。

在直流回路中串联两个 30mΩ 的电阻 R_4 和 R_5，利用直流电流在该两电阻上的电压降进行测量。

直流电流在 R_4 和 R_5 上的电压降，分别通过光耦合器 PC1 和 PC2 隔离后送入 CPU，由 CPU 进行判断和处理。

因为 R_4 和 R_5 上的压降 ΔU 是十分微小的，在正常运行的情况下，ΔU 不足使光耦合器的发光二极管导通，实际上并不能起测量的作用。因此，此电路主要用于进行过电流保护。就是说，只有当电流超过了上限值时，光耦合器才能够发挥作用，从而进行保护。

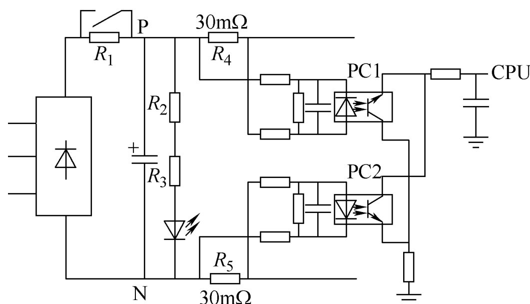


图 1-45　从直流回路取出电流信号

问题 44　能否利用电阻压降测量输出电路的电流?

从输出电路取出电流信号的电路如图 1-46 所示。其要点如下：

1. 测量两相电流　因为电动机是平衡负载，所以，三相电路中，只需测量两相电流即可。

2. 可靠隔离　因为两个电流信号分别属于不同的相，所以必须可靠隔离。这里采用了集成的光耦合器 PC1 和 PC2，其特点是：

（1）内有放大电路，可以将十分微小的信号进行放大。

（2）具有线性传输的特点，即其输出信号和输入信号之间呈线性关系，故可以测量电流的大小。

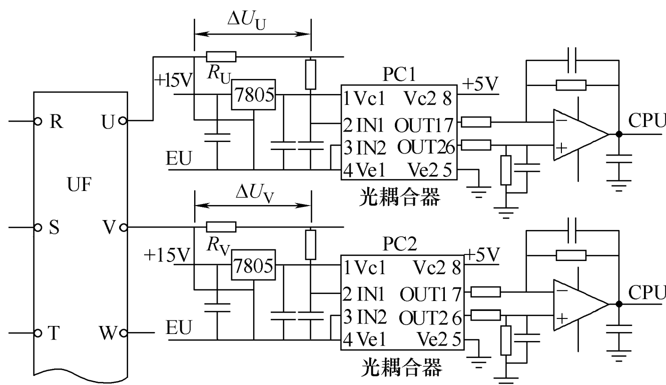


图 1-46　从输出电路取出电流信号

3. 其他要点

（1）为了提高测量准确度，故对电压的稳定性要求较高。电路里采用了 7805 集成稳压器，以取得更好的稳压效果。

（2）光耦合器输出的信号仍较微小，再由运算放大器进行线性放大后提供给 CPU。

4. 基本原理　把两个采样电阻 R_U 和 R_V 分别串联在变频器的两相（图中为 U 相和 V 相）输出电路里，当电动机运转时，在 R_U 和 R_V 上得到电压降 ΔU_U 和 ΔU_V，分别输入到集成光耦合器 PC1 和 PC2 的②脚和③脚，从 PC1 和 PC2 的⑥脚和⑦脚输出与 ΔU_U 和 ΔU_V 成正比的信号，又分别经运算放大器放大后提供给 CPU。

问题 45　怎样用霍尔元件测量变频器的电流？

令被测电流 I_X 流过高频磁心上的线圈，运算放大器 A1 组成恒流源，提供稳定的激励电流 I_H。霍尔芯片将得到与被测电流 I_X 成正比的电压信号 U_H，但 U_H 十分微弱，须经运算放大器 A2 放大后，才能得到 CPU 能够接收的“电流信号”，如图 1-47 所示。

CPU 在接收到电流信号后，一方面要变换成可显示的信号，以便显示屏进行显示；另一方面，要时刻和用户预置的“电流取用比”进行比较，以便进行过载或过电流的保护。

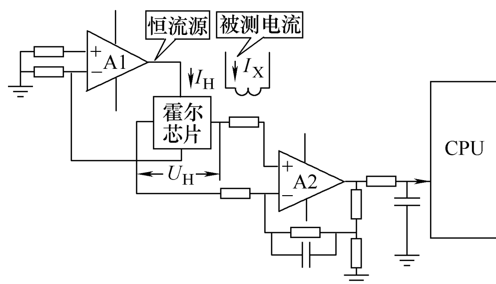


图 1-47　利用霍尔传感器的电流测量

问题 46　怎样进行过电流的判别？

过电流的判别如图 1-48 所示，说明如下：

1. 信号的处理　由电流检测电路检测到的三相电流信号 u_{UI}、u_{VI}、u_{WI}，分别经精密半波整流后并联，得到三相半波整流信号，如图中曲线①所示又经运算放大器 A1 放大并反相后，作为判断的依据，如图中的曲线②所示。

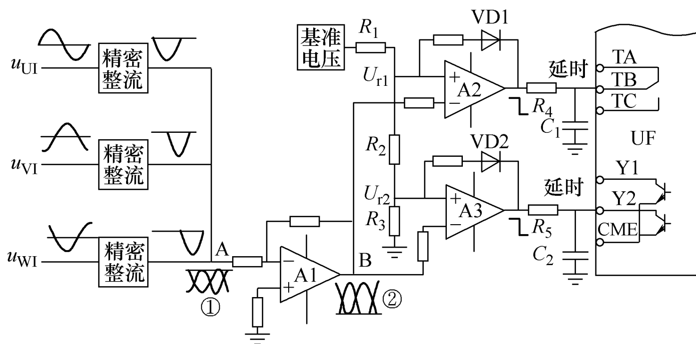


图 1-48　过电流的判别

2. 过电流的判别　基准电压经 R_1、R_2、R_3 分压后得到两个较低档次的电压 U_{r1}、U_{r2}，分别作为运算放大器 A2 和 A3 的比较基准电压。

U_{r2}较低，作为轻微过电流的检测基准电压。当三相电流的合成信号超过 U_{r2}时，A3 的输出信号翻转成低电位，经 R_5、C_2 延时后使

变频器的输出端处于“过载报警”状态，但不跳闸。

U_{r1}较高，作为严重过电流的检测基准电压。当三相电流的合成信号超过 U_{r1}时，A2 的输出信号翻转成低电位，经 R_4、C_1 延时后令变频器跳闸，并使报警继电器动作。

问题 47　怎样通过三相合成电流判断是否接地？

众所周知，电动机的三相电流是平衡的，其合成电流等于 0，即

$$\dot{I}_U + \dot{I}_V + \dot{I}_W = 0$$

式中的电流都是复数。

利用这一原理，把运算放大器 A 接成加法器，输入侧输入的是三相的电流信号，如图 1-49 所示。图中，电流 I 的上面加“·”号，表示它是代表电流相量，电流相加时应按复数进行计算，三个电流信号在 A 点相加。

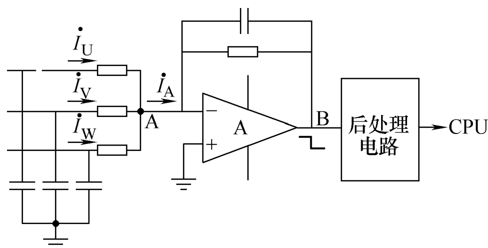


图 1-49　利用三相合成电流判断

在正常情况下，合成电流为 0，运算放大器的输出端 B 点的信号十分微小；当有一相接地时，三相电流将不平衡，其合成电流必大于 0，B 点的信号增大，经后处理电路整理后把三相电流不平衡的信号输入到 CPU。

问题 48　怎样通过三相合成磁场判断是否接地？

如图 1-50 所示，把变频器的三根输出线以同样的方法绕在同一个霍尔传感器的高频磁心上。当三相电流平衡时，磁心内的合成磁场等于 0，霍尔芯片上的霍尔电压也等于 0。当变频器的输出线有一相接地时，三相电流必不平衡，合成磁场不等于 0，霍尔芯片有霍尔电压输出，经运算放大器 A2 放大后输出到 CPU。这种方法的基本原理和上述的三相合成电流的方法实质上是完全相同的。

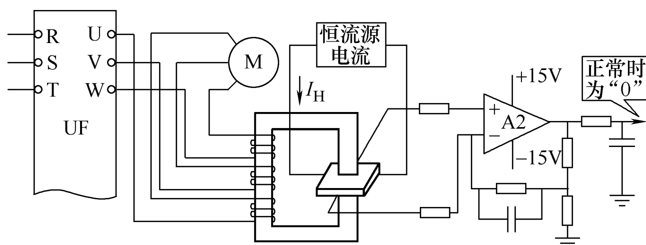


图 1-50　利用三相合成磁场判断接地

问题 49　怎样判断快速熔断器是否熔断？

部分变频器在直流电路中常常接入快速熔断器进行保护。当快速熔断器熔断时，应该把熔断的信号送入 CPU，以便封锁逆变管。同时令显示屏显示相关的故障原因。

检测快速熔断器熔断的电路如图 1-51 所示。

快速熔断器未熔断时，熔断器两端的电压 U_F 等于 0，晶体管 VT 截止，光耦合器 PC1 无输出，A 点为高电位。

当快速熔断器熔断时，熔断器两端的电压 U_F 大于 0，晶体管 VT 导通，光耦合器 PC1 导通，A 点变成低电位，输出给 CPU。

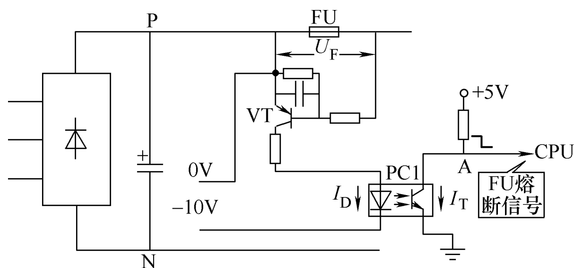


图 1-51　快速熔断器熔断的检测

1.8　电压和其他参数的检测

问题 50　变频器怎样直接检测直流电压？

变频器最容易波动的电压是直流电压 U_D，其大小非但和电源电压的波动有关，还和电动机的运转状态有关。因此，电压的检测通常

是检测直流电压。方法之一是直接从直流电压上取样，如图 1-52 所示。

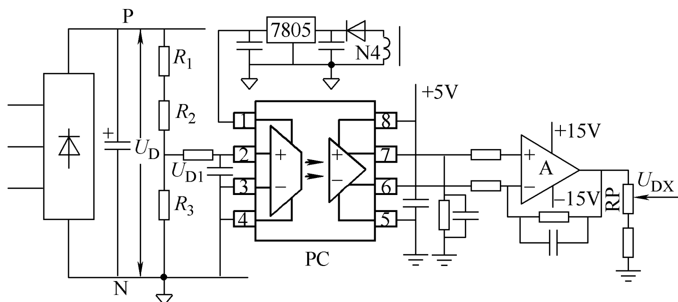


图 1-52　直流电压的直接采样

直接取样需要解决两个问题：第一个问题是必须解决好强电和弱电之间的隔离。因为电压的取样是在强电回路里，而取样电压和基准值进行比较和判断则是在弱电回路里。

第二个问题是提高灵敏度。说明如下：采样电压是由 R_1、R_2 和 R_3 分压而得的 U_{D1}。因为①脚上的电源电压只有 5V，故 U_{D1} 必须小于 5V，不到直流电压 U_D 的 1%。如果变化 1V，在 U_{D1} 上的反映只有不到 0.01V，检测电路必须能够检测到 0.01V 的变化。

为此，采用了集成光耦合器 PC 来进行隔离。与普通的光耦合器相比，集成光耦合器 PC 的内部增加了运算放大器，从而大大地提高了灵敏度。

采样电压 U_{D1} 从 PC 的②脚输入，从 PC 的⑦脚和⑥脚得到输出电压，运算放大器 A 接成跟随形式，进行功率放大，又从电位器 RP 上取出与直流电压成正比的采样信号。

问题 51　变频器怎样间接检测直流电压？

因为开关电源二次绕组所得电压的峰值是和直流电压 U_D 成正比的。所以，利用开关电源中某一二次绕组（如 W5）所得电压，经半波整流，如图 1-53 所示。但不进行滤波，图中的 C_1 只有 0.1μF，并不起滤波作用。这样，它主要反映峰值的大小，又经 R_1 和 R_2 分压后，就是直流电压的采样电压，输入到 CPU，和基准值进行比较。

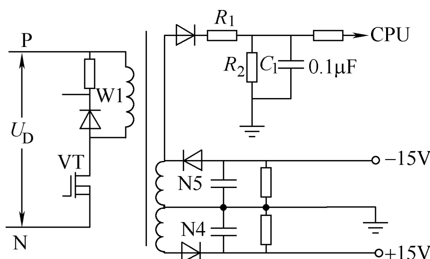


图 1-53　直流电压的间接采样

问题 52　变频器怎样测量温度？

温度的传感器件通常采用热敏电阻，如图 1-54 中的 RT。

由电阻 R_1、R_2、R_3 和稳压管 VS 组成桥路。A 点提供基准电位，B 点电位 u_B 则取决于热敏电阻 RT 的电阻值，即为温度信号。

当温度较低，$U_B < U_A$ 时，C 点为高电位，光耦合管 PC 处于截止状态，D 点为高电位，CPU 未得到信号。

当温度较高，$U_B > U_A$ 时，C 点为低电位，光耦合管 PC 的发光二极管有电流，光敏晶体管饱和导通，D 点变成低电位，CPU 得到温度过高的信号。

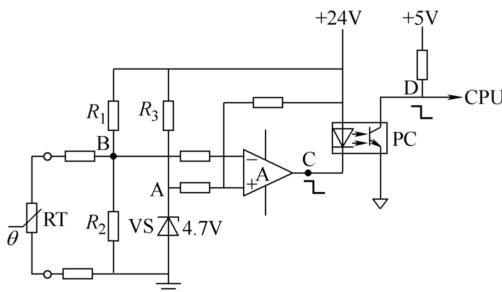


图 1-54　温度的检测电路

问题 53　变频器里的风扇电路是怎样的？

变频器里的风扇常见的有两种：

1. 交流风扇　大容量变频器常常配用 220V 的交流风扇。它的风量大，寿命也较长，但须同时配置 380/220V 的变压器，如图 1-55a 所示。

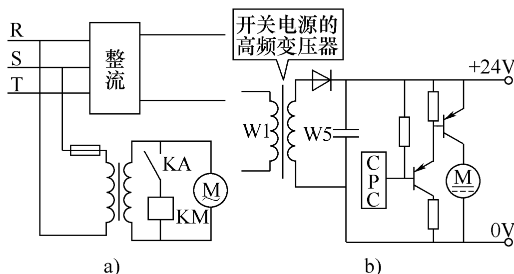


图 1-55　变频器里的风扇电路

a）220V 交流风扇　b）24V 直流风扇

2. 直流风扇　中小容量变频器中，常配用直流 24V 或 15V 的小风扇。电源由开关电源提供，可由 CPU 控制其通、断，如图 1-55b 所示。但这种风机的风量小，寿命也较短，通常只有 2～3 年，须注意及时更换。

1.9　变频器的输出电压

问题 54　变频的输出电压为什么要随频率下降？

当电动机的工作频率 f_X 下降时，各部分功率的变化情形如下：

1. 输入功率　即电动机吸收的电功率，为

$$P_1 = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi_1 \quad (1\text{-}18)$$

式中　P_1——电动机的输入功率（kW）；

U_1——电动机的线电压（V）；

I_1——电动机的线电流（A）；

$\cos\varphi_1$——电动机的功率因数。

式中，与输入功率有关的各因子中，除 $\cos\varphi_1$ 略有变化外，都和 f_X 没有直接关系。因此，可以认为，f_X 下降时，P_1 基本不变。

2. 输出功率　电动机输出的是机械功率（轴功率）为

$$P_2 = \frac{T_M n_M}{9550} \quad (1\text{-}19)$$

式中　P_2——电动机的轴功率（kW）；

T_M——电动机的电磁转矩（N · m）；

n_M——电动机的转速（r/min）。

当频率 f_X 下降时，同步转速 n_{0X} 下降，转子转速 n_{MX} 也下降，而电动机的电磁转矩 T_M 总是和负载转矩相平衡的。所以，在负载转矩不变的情况下，T_M 也不变。由式（1-18）可知，输出功率 P_2 也随 f_X 的下降而下降。

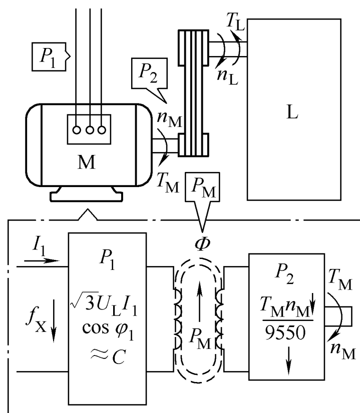


图 1-56　变频出现的新问题

3. 电磁功率　由图 1-56 可以看出，当输入功率 P_1 不变而输出功率 P_2 减小时，传递能量的电磁功率 P_M 必增大。这意味着主磁通 Φ_1 也必增大，并导致磁路饱和。

这是异步电动机在电流频率下降时出现的一个特殊问题。

为了在改变频率时，使电磁功率 P_M 保持不变，在输出功率减小时，输入功率也应作相应的减小，所以必须降低电压。

问题 55　什么是调频比？

变频器的输出频率与电动机额定频率之比，称为频率调节比，简称调频比：

$$k_f = \frac{f_X}{f_N} \tag{1-20}$$

式中　k_f——频率调节比；

f_X——变频器的输出频率（Hz）；

f_N——电动机的额定频率（Hz）。

式（1-19）也可写成

$$f_X = k_f f_N$$

问题 56　什么是调压比？

当变频器的输出频率为 f_X 时，对应的电压 U_X 与额定电压之比，称为电压调节比，简称调压比：

$$k_U = \frac{U_X}{U_N} \tag{1-21}$$

式中　k_U——电压调节比；

U_X——变频器的输出电压（V）；

U_N——电动机的额定电压（V）。

式（1-20）也可写为

$$U_X = k_U U_N$$

当电压与频率成正比地改变（$U/f = \text{const}$）时，

$$k_U = k_f$$

问题 57　什么是基本 U/f 线?

描绘 $k_U = k_f$ 时的 $U_X = f(f_X)$ 的曲线，称为基本 U/f 线，如图 1-57 所示。

图中，U_{max} 是变频器的最高输出电压，和 U_{max} 对应的频率称为基本频率，用 f_{BA} 表示。

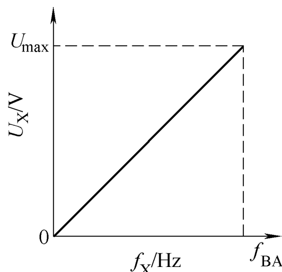


图 1-57　基本 U/f 线

在大多数情况下，基本频率等于电动机的额定频率，但也有时需要对基本频率进行调整，主要有：

（1）电动机的额定电压不等于 380V，或额定频率不等于 50Hz 时；

（2）在大马拉小车的情况下，需要通过降压实现节能时；

（3）在高频运行的情况下，需要适当增加磁通以增大电动机的电磁转矩时。

问题 58　变频器怎样改变输出电压?

把变频器的输出电压分成许多个小脉冲，并假设每半个周期中，小脉冲的个数是一定的。那么，当这些小脉冲之间的间隔很小时，总的周期较短，而脉冲的占空比则较大，半个周期的平均电压也较大，如图 1-58a 所示；反之，当这些小脉冲之间的间隔较大时，总的周期就增长了，而脉冲的占空比则变小了，平均电压也降低了，如图 1-58b 所示。

可以看出，调节脉冲的占空比，就同时调节了电压的频率和平均值的大小，这种方法，称为脉宽调制，用 PWM 表示。

脉宽调制的好处是，只需在逆变电路中控制脉冲上升和下降的时刻，就可以同时调节输出交变电压的频率和大小，控制方法十分简便。

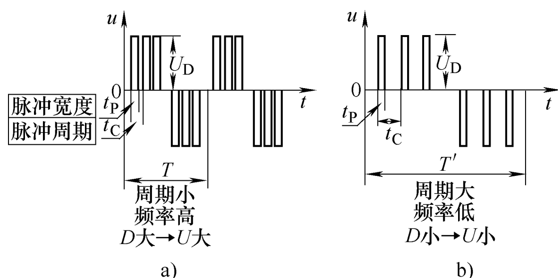


图 1-58　脉宽调制

a）频率较高时　b）频率较低时

问题 59　什么是正弦波脉宽调制？

变频器实际输出的脉冲序列不是等宽的，其占空比的大小是按正弦规律分布的，叫作正弦波脉宽调制，用 SPWM 表示。

如图 1-59b 所示。当正弦量处于最大值时，脉冲的占空比也最大。而当正弦量处于最小值时，脉冲的占空比也最小。

SPWM 的显著优点是：由于电动机的绕组具有电感性，因此，尽管电压是由一系列的脉冲构成的，但通入电动机的电流却十分逼近于正弦波。因此可以说，其平均电压和正弦电压是等效的，如图 1-59a 所示。

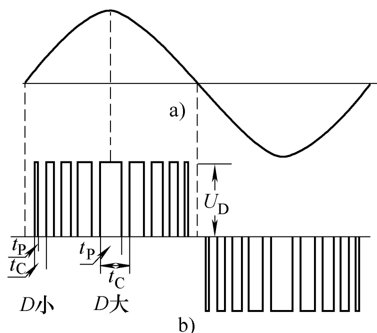


图 1-59　正弦波脉宽调制

a）正弦电压　b）正弦波脉宽调制

问题 60　怎样实现正弦波脉宽调制？

单极性调制虽然很少应用，但就产生脉冲系列的基本过程而言，和双极性调制是相同的，而单极性调制则比较容易说明问题。

SPWM 脉冲序列中，各脉冲的上升沿与下降沿的时刻是由正弦波和三角波的交点来决定的。这里，三角波称为载波，正弦波称为调制波。就这个特点而言，单极性调制和双极性调制是相同的。

单极性调制的特点是，三角波是单极性的，如图 1-60 所示。变频时：

（1）正弦波的频率随给定频率而变；三角波的频率则基本不变。

（2）正弦波的振幅按比值 U_{1X}/f_X 比和给定频率 f_X 同时变化；三角波的振幅则不变。

在载波的振幅和频率都不变的前提下，交点时刻是调制波的函数：

$$t = f(U_m, T)$$

式中　t——交点时刻（s）；

U_m——调制波的振幅值（V）；

T——调制波的周期（s）。

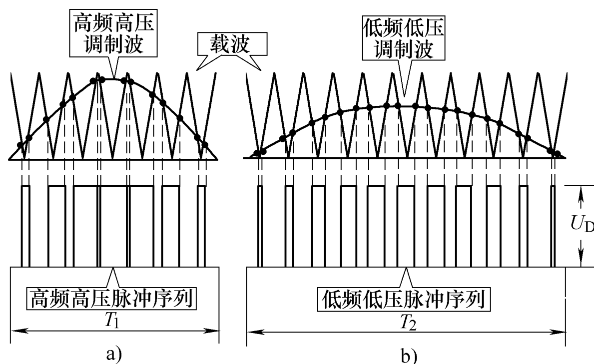


图 1-60　单极性调制实现 SPWM

a）频率较高时　b）频率较低时

当给定频率和对应电压改变时，所有交点的时刻同时改变，脉冲序列也随之改变。

问题 61　双极性调制是怎样工作的？

实际变频器中，通常都使用双极性调制方式。其特点是，正弦波和三角波都是双极性的，如图 1-61 所示。

双极性调制后的脉冲系列也是双极性的，如图中之 u_U、u_V、u_W。双极性调制得到的相电压脉冲序列很难看出它们的变化规律来。但是，当把它们合成为线电压时，其脉冲序列就和单极性调制的波形一样了，如图中的 u_{VW}所示。

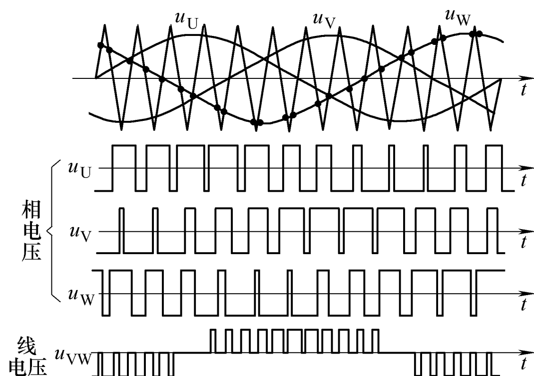


图 1-61 双极性调制方式

但变频器中并没有三角波和正弦波的发生器，而是在计算机软件里，储存着许许多多的交点方程。这些交点方程决定着脉冲序列中各脉冲的上升沿和下降沿的时刻，所有的交点方程都是频率和调制波振幅值的函数：

$$t = f(f_X, U_{mX}) \quad (1\text{-}22)$$

式中 t——脉冲上升或下降的时刻（s）；

f_X——变频器的输出频率（Hz）；

U_{mX}——调制波的振幅值（V）。

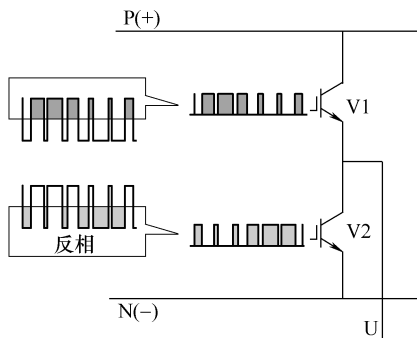


图 1-62 双极性调制特点

双极性调制的工作特点是，同一桥臂的上下两个逆变管总是交替导通的。就是说，每相脉冲序列的正半周作为 V1 管的驱动信号，则其负半周经反相后作为 V4 管的驱动信号，如图 1-62 所示。

问题 62 变频器的输出电压有什么特点？

变频器的输出电压是经过正弦脉宽调制的高频高压脉冲序列。脉冲频率等于载波频率；脉冲的幅值等于变频器的直流电压 U_D；脉冲的占空比取决于用户预置的电压频率比（U/f 比，简称为压频比）。

如上述，变频器输出电压的脉冲序列是和正弦波电压等效的，如图 1-63 所示。

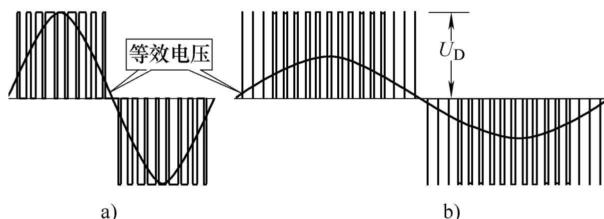


图 1-63　变频器的输出电压

a）频率较高　b）频率较低

在考虑变频器的输出电压对外部的影响时，常常需要注意高频高压脉冲波的影响；而在分析变频器输出电路的某些物理现象时，又可以用等效的正弦波电压来进行讨论。

问题 63　怎样改变变频器的输出电压？

这里所说的改变输出电压，是指在某一工作频率下，适当调整变频器的输出电压。

在低频运行时，为了保持电动机的磁通不变，常常需要调整电压频率比（*U/f* 比），实际上就是改变在该频率下运行时的变频器输出电压的大小，详见第 2 章的有关部分。

调整输出电压的具体过程是：由式（1-22），根据用户预置的“转矩提升”量，变频器将根据“转矩提升”量，来决定在某一频率下的调制波的振幅值，然后算出所有脉冲的上升沿和下降沿的时刻，如图 1-64 所示。

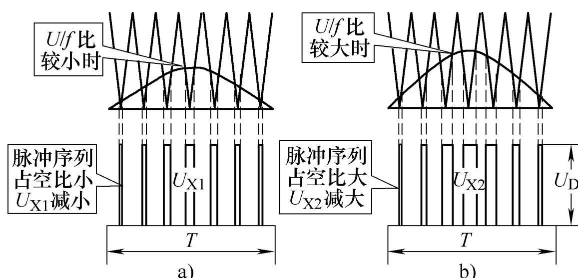


图 1-64　调整输出电压

a）压频比较小　b）压频比较大

问题 64　逆变管在交替导通时为什么需要死区时间？

变频器在进行脉宽调制时，一般都采用双极性调制的方式。双极性调制在实施过程中，同一桥臂的两个 IGBT 是不断地交替导通的。每一个 IGBT 从截止状态到饱和导通状态，又从饱和导通状态到截止状态，都需要时间：从截止到饱和导通所需时间，称为开通时间，从饱和导通到截止所需时间称为关断时间，如图 1-65a 所示。

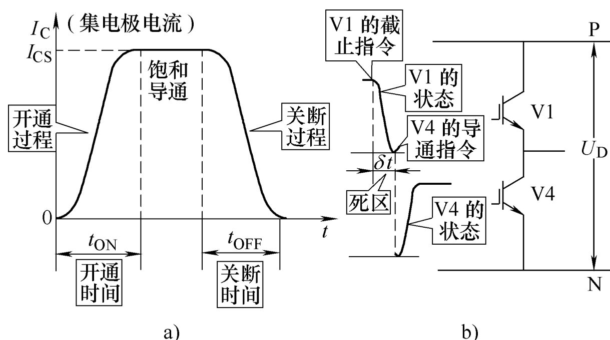


图 1-65　逆变管的交替导通

a）开通与关断过程　b）交替导通的特点

在交替导通过程中，如果原来导通的 IGBT 尚未完全截止，而另一个 IGBT 开始导通，则必将造成两个 IGBT 同时导通的直通现象。

为了防止直通，在一个 IGBT 的截止指令和另一个 IGBT 的导通指令之间，必须留有死区时间，死区时间必须大于关断时间，如图 1-65b 所示。

问题 65　载波频率会影响输出电压吗？

死区时间是不工作的时间，不工作时间长了，必然会影响变频器的输出电压。

如图 1-66 所示，交替导通的次数是脉冲个数的两倍。所以，载波频率高了，总的死区时间就长了，输出电压就将降低。

由图可以看出，如果以载波频率为 4kHz 时的输出电压为 100% 的话，当载波频率增大为 14kHz 时，输出电压就只有 71% 了。

所以，载波频率高了，会导致电动机电流的增大。

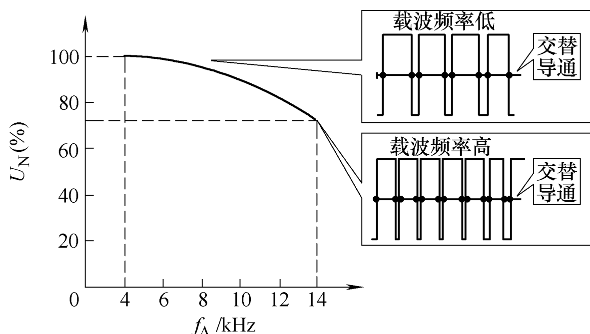


图 1-66　载波频率对电压的影响

问题 66　载波频率是怎样影响最大输出电流的？

载波频率对变频器最大输出电流的影响主要体现在两个方面：

1. 漏电流增加　载波频率高了，线间分布电容的容抗减小，通过分布电容的漏电流就增加了，从而增加了 IGBT 的负担，减小了逆变桥向电动机输出电流的能力，如图 1-67a 所示。

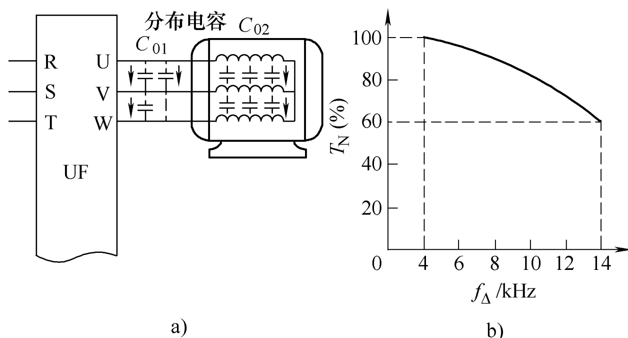


图 1-67　载波频率对输出电流的影响

a）电路中的分布电容　b）最大输出电流与载波频率的关系

2. 开关损失增加　IGBT 每一次状态的转换（每开关一次），都会损耗一定的功率，称为开关损耗。载波频率高了，IGBT 的开关次数增多，开并损耗就增加了，开关损耗的增加将导致 IGBT 的发热。

所以，载波频率高，变频器允许输出的最大电流将减小，如

图 1-68b所示。如果以载波频率为 4kHz 时的最大输出电流为 100% 的话，当载波频率增大为 14kHz 时，最大输出电流就只有 60% 了。

问题 67　为什么电磁噪声和载波频率有关?

变频器的输出电流中，存在着与载波同频率的谐波分量，电动机的磁路中就有谐波磁通，并在硅钢片中感应出涡流。涡流与涡流之间的电动力使硅钢片振动而产生电磁噪声。

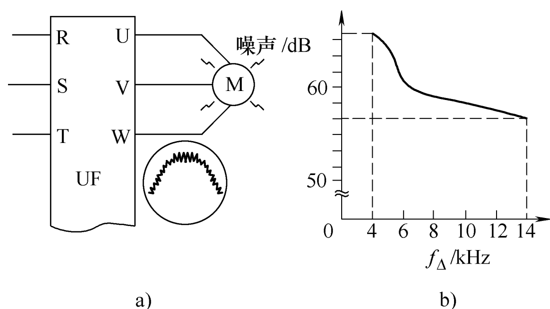


图 1-68　载波频率对噪声的影响
a）变频器的输出电流　b）噪声与载波频率的关系

噪声的“大小”，又和人耳对声音的灵敏度有关。当载波频率很高时，人耳的灵敏度较低，噪声就“小”；载波频率较低时，人耳的灵敏度较高，噪声就“大”。

如图 1-68 所示，当载波频率为 4kHz 时，噪声可达 66dB；而当载波频率为 14kHz 时，噪声可降低为 56. 5dB。

第2章　变频器的选型、安装与测量

2.1　变频器的选型

问题1　选择变频器时，应注意些什么？

大体上说，有以下几个方面：

1. 变频器容量的选择　变频器说明书中，有“配用电动机容量”一栏，但并不能作为唯一依据。在许多场合，是需要另作考虑的，详见问题6。

2. 变频器类型的选择　目前市场上的变频器，大致可分为三类：

（1）通用型变频器　通常指没有矢量控制功能的变频器，也称简易变频器；

（2）高性能变频器　通常指配备矢量控制功能的变频器；

（3）专用变频器　专门针对某种类型的机械而设计的变频器，如水泵及风机用变频器、电梯专用变频器、起重机械专用变频器、张力控制专用变频器等。

用户应根据生产机械的具体情况进行选择。

3. 性能价格比　这里所说的性能价格比，实际上有两个方面：

（1）功能与价格之间的评估　主要是在选择通用变频器或高性能变频器之间的评估；

（2）品质与价格之间的评估　例如，对于一些十分重要，不允许停机的场合，即使价格贵一些，也应选择品质较好，不容易发生故障的变频器。

4. 售后服务　一般说来，多数进口变频器的工艺水平较国产变频器好一些，故障率略低一些。但进口变频器往往具有更新换代快，而国内的零部件不够齐全，代理人员又流动频繁等特点。因此，期限较长的售后服务比较薄弱。

问题2　变频器有哪些额定数据？

以富士G1S系列变频器为例，如图2-1所示，主要的额定数据有：

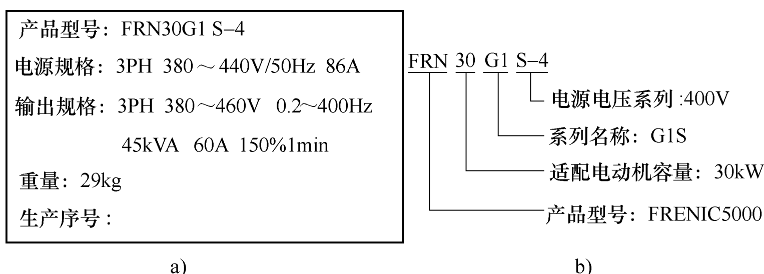


图2-1　富士G1S系列变频器铭牌

a）变频器铭牌　b）型号说明

1. 输入侧数据

（1）额定电压　我国中小容量变频器的额定电压多为380V三相；

（2）额定频率　我国为50Hz。

（3）额定电流　在输出额定电流时，变频器的输入电流。

2. 输出侧数据

（1）额定输出电压　因为变频器的输出电压是随频率而变的，所以，其额定输出电压只能规定为输出电压中的最大值。

（2）额定输出电流　允许长时间通过的最大电流，是用户在选择变频器容量时的主要依据；

（3）额定输出容量　由额定输出电压和额定输出电流的乘积决定：

$$S_N = \sqrt{3}U_N I_N \tag{2-1}$$

式中　S_N——额定输出容量（kVA）；

U_N——额定输出电压（V）；

I_N——额定输出电流（A）。

（4）配用电动机容量　指在带动连续不变负载的情况下，能够配用的最大电动机容量。与额定输出容量之间的关系如下：

$$P_N = S_N \eta_M \cos\varphi_M \tag{2-2}$$

式中　P_N——配用电动机容量（kW）；

η_M——电动机的额定效率；

$\cos\varphi_M$——电动机的额定功率因数。

（5）输出频率范围　即输出频率的最大调节范围，通常以最大

输出频率和最小输出频率来表示。几种常见变频器的频率范围见表 2-1。

表 2-1　常见变频器的频率范围

变频器型号	频率范围/Hz	变频器型号	频率范围/Hz
时代 TVF2000	0 ~ 300	明电 VT230S	0.1 ~ 440
康沃 CVF-G2	0 ~ 500	安川 CIMR-G7A	0.01 ~ 400
安邦信 ANB-G7	0 ~ 400	艾默生 TD3000	0 ~ 400
台达 VFD-B	0.1 ~ 400	ABBACS550-01	0.1 ~ 500
LG STARVERT-iS5	0 ~ 400	瓦萨 VACON-CX	0 ~ 500
日立 SJ300	0.1 ~ 400	丹佛士 VLT5000	0 ~ 132, 0 ~ 1000
三菱 FR-A540	0.2 ~ 400	西门子 440	0 ~ 650

问题 3　变频器的最大输出电压能够高于输入电压吗?

可以的。今以单极性调制为例，说明如下：

一般说来，当调制波（正弦波）的振幅值与载波（三角波）的振幅值相等时，变频器的最大输出电压与输入电压是相等的（实际上，由于交替导通时具有死区的原因，最大输出电压略小），如图 2-2a 所示。而当调制波的振幅值大于载波的振幅值时，变频器的最大输出电压将大于输入电压，如图 2-2b 所示，但增大的幅度有限。

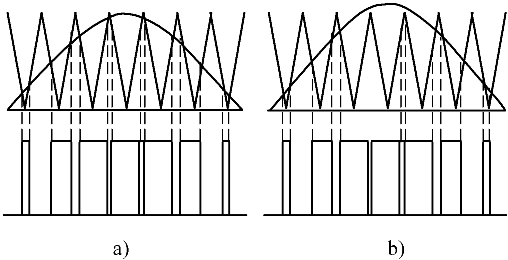


图 2-2　变频器的最大输出电压

a）等于输入电压　b）大于输入电压

问题 4　变频器的额定输入电流为什么比输出电流大了许多?

原因如下:

(1) 变频器的输入电流中包含了许多谐波成分, 而所有的谐波电流都是无功电流。

(2) 变频器输入电流的基波分量必须不小于额定输出电流。

(3) 变频器铭牌上的额定输入电流是包含了谐波电流的, 所以比额定输出电流大。

$$I_{N1} = \sqrt{I_{01}^2 + I_{05}^2 + I_{07}^2 + I_{11}^2 + \cdots} > I_{01} \geqslant I_N \qquad (2\text{-}3)$$

式中　I_{N1}——变频器的额定输入电流 (A);

I_{01}、I_{05}、I_{07}、…——I_{N1} 中的基波分量、5 次谐波分量、7 次谐波分量等 (A);

I_N——变频器的额定输出电流 (A)。

问题 5　频率精度和分辨率有什么区别?

1. 频率精度　指变频器输出频率的准确程度, 即变频器的实际输出频率与给定频率之间的误差。通常用最高频率 (由用户设定) 的百分数来表示。

例如, 频率精度为 0.01%, 用户设定的最高频率是 50Hz。则:

输出频率的误差 Δf 为

$$\Delta f = 50 \times 0.01\% = 0.005\text{Hz}$$

假设给定频率为 40Hz, 则实际输出频率在 39.995 ~ 40.005Hz 之间。

2. 频率分辨率　指输出频率的最小调节量, 即每相邻两挡输出频率之间的最小差值。

例如, 频率分辨率为 0.01Hz, 则当输出频率为 45Hz 时, 有:

上一挡的最小频率为 45.01Hz; 而下一挡的最大频率为 44.99Hz。

问题 6　变频器中的配用电动机功率能否作为选择依据?

简单地把配用电动机容量作为选择变频器容量的依据是不恰当的。选用时, 须注意以下情况:

1. 注意对照变频器和电动机的额定电流　我国通用的 Y 系列三相笼型异步电动机常用规格的额定电流与几种较为典型的变频器额定电流的对照情况如表 2-2。

表 2-2　电动机与对应变频器的额定电流

电动机容量 P_{MN}/kW		15.0	18.5	22.0	30.0	37.0	45.0	55.0	75.0
电动机额定电流 I_{MN}/A	$2p=2$	29.4	35.5	42.2	56.9	70.4	83.9	102.7	140.1
	$2p=4$	30.3	35.9	42.5	56.9	69.8	84.2	102.5	139.7
	$2p=6$	31.5	37.7	44.6	59.5	72.0	85.4	104.9	142.4
	$2p=8$	34.1	41.3	47.6	63.0	78.2	93.2	112.1	152.8
变频器额定电流 I_N/A	艾默生 TD3000	32.0	37.0	45.0	60.0	75.0	90.0	110.0	152.0
	安川 CIMR-G7	34.0	42.0	52.0	65.0	80.0	97.0	128.0	165.0
	ABB-ACS800	34.0	44.0	55.0	72.0	86.0	103.0	141.0	166.0
	瓦萨 VACON-CX	32.0	42.0	48.0	60.0	75.0	90.0	110.0	150.0

表中，p 是磁极对数，$2p$ 是磁极个数。从表 1-2 可以看出：

（1）在 15kW 挡，几种变频器的额定电流都小于 8 极电动机的额定电流；

（2）艾默生 TD3000 系列变频器各挡的额定电流都小于 8 极电动机的额定电流，个别挡（如 18.5kW 和 55kW 挡）也小于 6 极电动机的额定电流。

（3）瓦萨 VACON-CX 系列变频器 37kW 以上各挡的额定电流也都小于 8 极电动机的额定电流。

上述情况说明，在决定变频器的容量时，不能盲目地按变频器说明书中的配用电动机容量来选择，而必须认真对照变频器和电动机的额定数据，以及对负载的轻重进行估计后再行选择。

2. 注意测量电动机的最大运行电流　生产机械在决定电动机容量时，是根据电动机的发热情况来进行选择的。就是说，只要电动机的温升不超过额定温升，短时间的过载是允许的。但变频器的过载能力却很弱。

所以，对于一些负载经常变化的负载，应注意测量电动机的最大运行电流。在选择变频器的容量时，变频器的额定电流必须大于电动机的最大运行电流。

问题 7　在哪些情况下，可以按说明书中的配用电动机功率来选择变频器？

大体上说，在下列情况下，变频器的容量可以按说明书中的配用电动机容量来选择。即，配用电动机容量与实际电动机的容量相同。

1. 连续不变负载　即负载是连续运行的，并且在运行过程中，其工作电流基本不变。

2. 电动机的裕量较大　即虽然负载是变动的，但由于电动机的裕量较大，负载的最大电流不超过变频器的额定电流。

3. 电动机的冲击电流时间甚短者　负载的惯性不大，偶而产生冲击电流，但维持时间不超过 1min 者。

问题 8　在哪些情况下，有必要考虑加大变频器的容量？

这里所说的“加大变频器容量”，是相对于变频器的配用电动机容量等于实际电动机容量而言的。大体上说，可归纳如下：

1. 变频器的额定电流偏低者　如上述，部分变频器的额定电流小于同容量电动机的额定电流时，应根据电动机的负载情况考虑选择大一挡的变频器。

2. 电动机可能短时间过载者　因为电动机所谓的“短时间”，是相对于发热时间常数而言的。少则几分钟，多则几十分钟。而变频器的过载能力，通常是 150%，1min。与电动机相比，等于没有过载能力。所以，如果电动机可能在短时间内过载运行的话，变频器的容量应加大。

3. 对加、减速时间有特殊要求者　电动机加速时间的长短是一个与惯性大小有关的相对概念。例如，加速时间为 5s，相对于惯性较大（GD^2 大）的负载来说，可能太短；但相对于惯性较小（GD^2 小）的负载来说，又可能太长。

一般说来，对于需要在重载情况下起动和停机的负载，在下列情况下，应考虑加大变频器的容量：

（1）要求能够快速起动和停机者；

（2）点动比较频繁者。

4. 有冲击负载者　例如，电动机与负载之间是通过离合器相结合的，如图 2-3 所示。通常是在电动机已经旋转起来状态下，由于离合器的结合，使负载也旋转起来。显然，在离合器刚结合的瞬间，电动

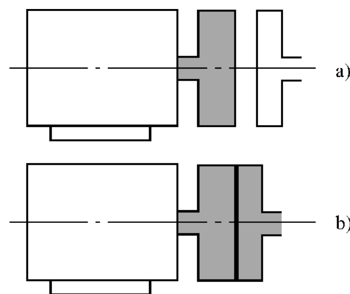


图 2-3　装有离合器的拖动系统
a）脱开状态　b）合拢状态

机的转速将下降，转差增大，电流也增大，可能导致过电流保护动作。针对这种情况，应加大变频器的容量。

问题 9　电动机为 132kW，实际使用功率约为 50kW，能否配用较小的变频器？

原则上是可以的，但应注意以下问题：

1. 选择原则　应根据电动机的最大运行电流来选择，并适当留有余量。

2. 注意限制起动电流　容量大的电动机，每相绕组的匝数较少，电感量较小。故电流的脉动幅度和起动瞬间的冲击电流较大，起动过程中的加速电流也较大。因此，有必要采取如下对策：

（1）在变频器和电动机之间接入输出电抗器，如图 2-4 中之 L_0 所示，L_0 主要是对冲击电流起缓冲作用，以保护变频器。

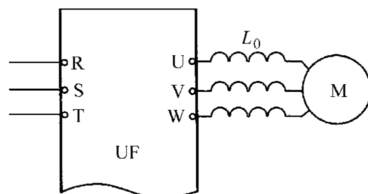


图 2-4　接入输出电抗器

（2）起动时的 U/f 比应预置得小一些。

（3）加速时间和减速时间应预置得长一些，如果设备要求快速起动和停机，则变频器的容量不宜选得太小。

问题 10　负载的最大工作频率为 40Hz，能否选用容量较小的变频器？

这要根据负载特点来决定：

1. 恒功率负载　因为在转速下降时，负载功率并不减小，所以变频器的容量不能减小。

2. 恒转矩负载　转速下降时，负载的转矩不变，则电动机的工作电流并不减小，故变频器的容量也不能减小。

3. 二次方律负载　转速下降时，负载转矩减小，电动机的工作电流也减小，变频器的容量可以考虑减小，但应注意采用问题 9 中的几项对策。

问题 11　变频调速时电动机的功率需要比直流电动机加大一挡吗？

一般情况下，是不需要加大的。有时甚至还可以适当减小电动机

的容量，如龙门刨床的刨台电动机。

但在下列情况下，应注意考虑：

1. 需要加大电动机容量者　由于通常异步电动机是依靠内部的扇叶来散热的，低速运行时，散热条件变差，不宜长时间运行。所以，如果原来的直流电动机是在较低转速下长时间运行的话，改用变频调速时，在无特殊散热措施的情况下，应考虑加大电动机的容量。

2. 需要加大变频器容量者　直流电动机的调压调速装置的过载能力较强，短时间的过载运行是允许的，但变频器则不允许。所以，如果原来的直流电动机在运行过程中有短时间过载现象的话，应考虑加大变频器的容量。

问题 12　在选用潜水泵变频器时，应注意些什么？

1. 潜水泵的运行特点　因为在水下运行时，容易进入杂物。所以：

（1）考虑到进入杂物后，电动机的负载将加重。所以，潜水泵电动机具有较强的过载能力；

（2）在杂物刚进入潜水泵时，有可能产生较大的冲击电流。

2. 主要对策

（1）加大变频器的容量；

（2）在变频器和电动机之间串入一个电抗器，如图 2-4 所示。

问题 13　一台变频器带动多台电动机时怎样选择变频器容量？

还是按最大电流原则进行选择。根据运行情况的不同，有以下两种情形：

1. 多台电动机同时起动和运行　只需按变频器的额定电流大于多台电动机额定电流之和进行选择

$$I_N > 1.05 \sim 1.1 \times \Sigma I_{MN} \tag{2-4}$$

式中　ΣI_{MN}——同时运行电动机的额定电流之和（A）。

2. 多台电动机分别起动　必须考虑后起动电动机的直接起动电流：

$$I_N > \frac{1.05 \sim 1.1 \times \Sigma I_{MN} + K_1 + \Sigma I_{ST}}{K_2} \tag{2-5}$$

式中　I_{ST}——电动机的起动电流（为额定电流的 5 ~ 7 倍）（A）；

ΣI_{ST}——同时起动电动机的总起动电流（A）；

K_1——安全系数。如后起动电动机都从停止状态起动时，K_1 =

1.2；如后起动的电动机有可能从自由制动状态下重新起动时，$K_1 = 1.5 \sim 2$；

K_2——变频器的过载能力，$K_2 = 1.5$。

问题 14　变频器的几种控制方式有哪些主要特点？

主要特点见表 2-3。

表 2-3　变频器几种控制方式的比较

比较项目	V/F 控制方式	无反馈矢量控制方式	有反馈矢量控制方式
调速范围	1∶10 ~ 1∶20	1∶20 ~ 1∶80	1∶100 以上
最低运行频率/Hz	3	1(部分为 5Hz)	0.1 以下
最高运行频率/Hz	80	100	100
最小加减速时间/s	0.2	0.1	数十 ms
转矩控制	不能	部分可能	可能
额定负载时的转速变化率(%)	3 ~ 5	0.5 ~ 1	0.05 ~ 0.5

注：上述指标因变频器的类别和电动机的特性而异，故表中数据仅供参考。

2.2　变频器的安装

问题 15　变频器对周围环境有些什么要求？

变频器是一台全晶体管设备，所以，对周围环境的要求和其他晶体管设备大致相同。

1. 环境温度　－10℃ ~ 40℃时，测试环境温度的点应在距变频器约 5cm 处，如图 2-5 所示。

在环境温度大于 40℃的情况下，每增加 5℃，其运行功率应下降 30%。

2. 环境湿度　相对湿度应不超过 90%，无结露现象。

3. 其他条件　在变频器安装的位置应无直射阳光、无腐蚀性气体及易燃气体、尘埃少、海拔低于 1000m 等。

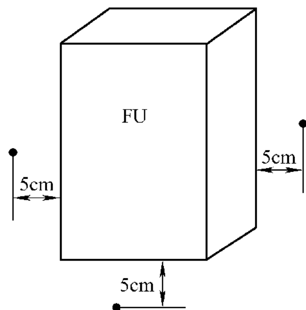


图 2-5　环境温度的测试点

问题 16　变频器长期不用会发生什么问题？

长期不用可能产生的问题大致如下：

1. 高压滤波电容器　如长期不用，可能发生的现象有：

（1）电容器盖“鼓包”，甚至内部电解液溢出；

（2）漏电流增大，甚至因此而导致电容器发热；

（3）电容量减少，容易和电动机的电感发生谐振而产生高电压，损坏逆变电路中的器件。

2. 低压电解电容器　也可能发生电解液溢出，甚至使印刷电路板受到腐蚀；

3. 冷却风机　如长期不用，轴承的润滑油可能干涸，将影响其使用寿命。

所以，对于长期不用的变频器，每隔半年或一年，应通电运行（空转）一天。

问题 17　电解电容器的寿命有多长？

电解电容器的使用寿命与环境温度有关，据日本安川公司提供的资料，电解电容器的寿命与环境温度之间的关系如图 2-6 所示。

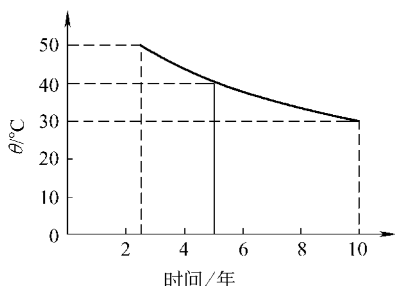


图 2-6　电解电容器的寿命

由图知，如果周围温度在 30℃以下，电解电容器的使用寿命可长达 10 年以上；而当周围温度为 50℃时，使用寿命只有 2.5 年。

问题 18　长期不用的电解电容器存在什么问题？如何恢复正常？

变频器在仓库里搁置时间在半年以上时，滤波用电解电容器的漏电流将增大。

使用前，应在电解电容器上施加约 50% 的额定电压，通电半小时以上，电解电容器即可恢复。

因为 380V 变频器中滤波电容器的额定电压大多为 400 ~ 450V，而 220V 交流电压经整流、滤波后的平均电压，正好满足要求，如图 2-7 所示。

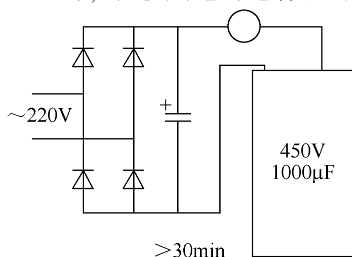


图 2-7　电解电容器的处理

问题 19　安装变频器时应注意哪些问题?

和任何设备一样,变频器在运行过程中也一定会有功率损耗,并转换成热能,使自身的温度升高。粗略地说,每千伏安的变频器容量,其损耗功率约为 40 ~ 50W。因此,安装变频器时必须考虑的最主要问题便是如何把变频器所产生的热量充分地散发出去。

1. 壁挂式安装的散热处理　由于变频器本身具有较好的外壳,故一般情况下,允许直接靠墙安装,称为壁挂式。

为了保证良好的通风,所有变频器都必须垂直安装,且变频器与周围阻挡物之间的距离应符合如图 2-8a 所示的要求。即:

两侧:≥100mm;

上下方:≥150mm。

为了防止异物掉在变频器的出风口而阻塞风道,最好在变频器出风口的上方加装保护网罩。

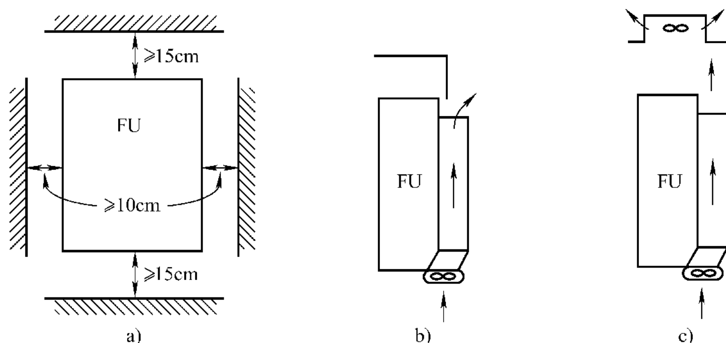


图 2-8　单台安装

a) 挂壁式　b) 柜式外冷　c) 柜式内冷

2. 单台柜式安装的散热处理　当周围的尘埃较多,或和变频器配用的其他控制电器较多,需要和变频器安装在一起时,可采用柜式安装。

如周围环境比较洁净、尘埃较少时,应尽量采用柜外冷却方式,如图 2-8b 所示;

如必须采用柜内冷却方式时,则应在柜顶加装抽风式冷却风扇。

冷却风扇的位置应尽量在变频器的正上方，如图 2-8c 所示。

3. 多台柜式安装的散热处理　当一个控制柜内装有两台或两台以上变频器时，应尽量并排安装（横向排列），如图 2-9a 所示。

如必须采用纵向方式排列时，则应在两台变频器之间加一隔板，以避免下面变频器排出的热风进入到上面的变频器中去，如图 2-9b 所示。

4. 户外安装的散热处理　一般说来，变频调速控制柜应安装在室内。如必须安装在户外（例如油田的抽油机用变频器）时，则控制柜必须采用双层结构方式，如图 2-10 所示。

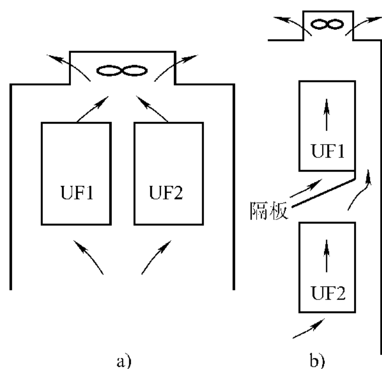


图 2-9　两台变频器的柜式安装
a）横向排列　b）纵向排列

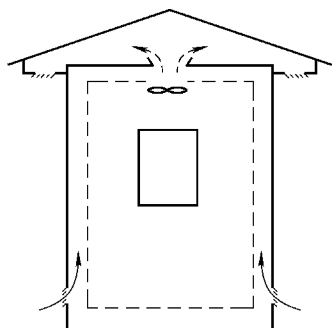


图 2-10　户外控制柜

所用控制柜必须既能防止太阳的直接照射，又能防止雨水的浸入。如有可能，在隔层之间，最好能采用强制风冷方式。

除此以外，户外安装时，还必须注意当地的冬季最低温度。如果低于 10℃ 的话，应在柜内安装加热装置。并且，应能进行温度的自动控制。

问题 20　变频器壁挂式安装和柜式安装哪个好？

一般说来，壁挂式安装的主要优点是散热较好，但对周围环境的要求较高。

另一方面，变频器往往还有许多外围器件，如断路器、接触器、快速熔断器、电抗器、滤波器等等。

因此，在周围环境比较洁净，进出人员较少的场合，如水泵房、中央空调的控制室等处，在外围器件不多的情况下，可以考虑采用壁挂式安装。

反之，对于周围环境不很洁净，来往人员较多，外围器件也较多的场合，最好采用柜式安装。

问题 21　在温度较高的控制室内是否一定要装空调？

有条件的话，安装空调无疑是最好的解决办法。

如无条件，则在夏季气温较高时，应将控制柜门打开，并用风扇对着变频器鼓风，也可以起到较好的散热效果。

问题 22　在灰尘较多的场合使用变频器时，怎么办？

最好单独砌一个控制室，并保持室内的通风和洁净。

如无条件，则应加强控制柜内的通风，在进风口加过滤网，并经常注意进风口和出风口的除尘。

2.3　变频器的外接主电路

问题 23　低压断路器的作用是什么？怎样选择？

1. 低压断路器的作用

(1) 隔离作用　当变频器长时间不用，或需要进行维修时，可通过低压断路器的切断，使变频器与电源隔离；

(2) 保护作用　低压断路器具有过电流和欠电压等保护功能，可以对变频器的主电路起一定的保护作用。

2. 选择时必须考虑的因素　因为低压断路器具有过电流保护功能，为了避免变频器接通电源时引起低压断路器的误动作，在进行选择时，必须考虑以下因素（见图 2-11）：

(1) 变频器在刚接通电源的瞬间，对于小容量变频器来说，电容器的充电电流可高达额定电流的(2 ~ 3)倍；

(2) 变频器的进线电流是脉冲电流，谐波成分极多。当基波电流达到额定值时，实际电流的有效值要比额定电流大得多；

(3) 变频器本身具有一定的过载能力，通常为 150%，1min。

3. 选择方法　为了避免误动作，断路器的额定电流 I_{QN} 应选：

$$I_{QN} \geqslant (1.3 \sim 1.4) I_N \tag{2-6}$$

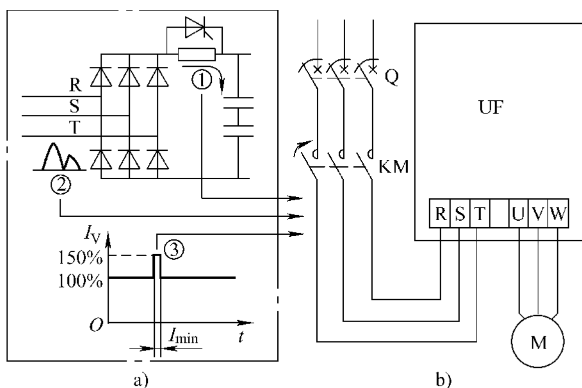


图 2-11　接通电源时影响断路器误动作的因素

a）各种因素示意图　b）变频器的外接主电路

问题 24　变频器前面一定要加接触器吗？怎样选择？

1. 输入侧接触器的作用　一般说来，在断路器和变频器之间，应该有接触器。其主要作用如图 2-12 所示：

（1）控制方便　可通过按钮开关方便地控制变频器的通电与断电；

（2）发生故障时可自动切断变频器电源　这包括两个方面：

1）变频器自身发生故障，报警输出端子动作（图中之 B-C 端之间断开）时，可使接触器 KM 迅速断电，从而使变频器立即脱离电源；

2）当控制系统中有其他故障信号（如图中之 AL 触点断开）时，也可迅速切断变频器电源。

2. 选择要点　因为接触器本身没有保护功能，不存在误动作问题。选择时，只须其主触点的额定电流 I_{KM} 不小于变频器的额定电流就 I_N 可以了：

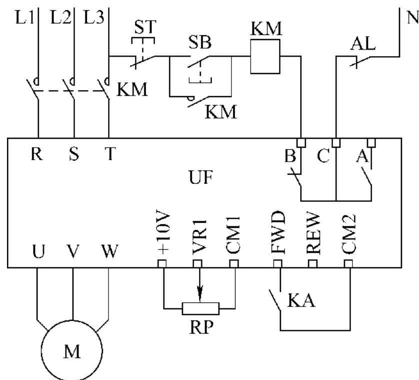


图 2-12　输入接触器的作用

$$I_{KM} \geqslant I_N$$

问题 25　变频器前端是否需要加快速熔断器？

就保护功能而言，快速熔断器的作用和断路器类似。一般说来，可以接熔断器，也可以不接。但也有的认为，快速熔断器的保护动作比断路器快，所以应该接。

如接入，其选择方法与断路器相同。

问题 26　变频器与电动机之间要不要接输出接触器？

1. 一台变频器控制一台电动机且不需要切换　当一台变频器只控制一台电动机，且并不要求和工频进行切换时，变频器与电动机之间不要接输出接触器。主要原因是：

如果接入了输出接触器，则有可能在变频器的输出频率较高的情况下起动电动机，产生较大的起动电流，导致变频器跳闸。

2. 必须接输出接触器的场合　必须接输出接触器的情况有两种，如图 2-13 所示。

（1）一台变频器接多台电动机　这时，每台电动机必须有单独控制的接触器，如图 a 所示；

（2）变频和工频需要切换　这种情况下，当电动机接至工频电源时，必须切断和变频器之间的联系。因此，电动机和变频器之间的接触器是必须接的，如图 b 所示。

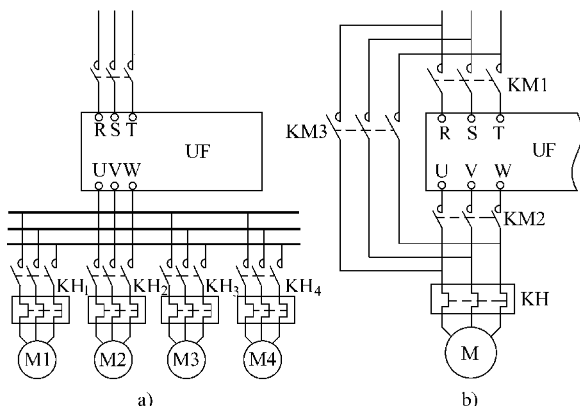


图 2-13　必须接输出接触器的场合

a）一台变频器接多台电动机　b）变频和工频切换

问题27　变频器与电动机之间是否需要接入热继电器？

和输出接触器类似，当一台变频器只控制一台电动机，且并不要求和工频进行切换时，由于变频器本身具有热保护功能，所以没有必要接热继电器；

当一台变频器接多台电动机时，由于每台电动机的容量比变频器小得多，变频器不可能对每台电动机进行热保护。则每台电动机只能分别由各自的热继电器进行保护；

当电动机需要在变频和工频之间进行切换控制的情况下，因为在工频运行时，变频器不可能对电动机进行热保护，故接入热继电器是必需的。

问题28　热继电器在变频器输出电路内容易误动作，何故？

变频器的输出电流尽管已经和正弦波十分地接近了，但它毕竟还有和载波频率相同的谐波成分。因此，在电动机的输出功率相同的情况下，其每相电流的有效值大于工频运行时的相电流。这就是当电动机在额定状态下运行时，热继电器容易误动作的原因。解决的方法有：

1. 加大热继电器的挡次　一般说来，热继电器的动作电流应增加10%左右。

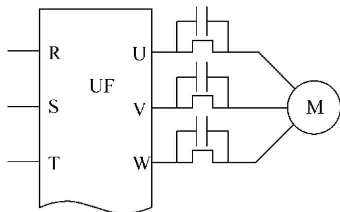


图2-14　热继电器接旁路电容

2. 接入旁路电容　在热继电器的发热元件旁边，并联一个旁路电容器，使谐波电流不流经热继电器的发热元件，如图2-14所示。

问题29　为什么变频器的输出线有时需要加粗？

因为变频器的输出电压是和输出频率一起变化的（详见后述），当输出频率很低时，输出电压也很低。因此，低频运行时线路上的电压降所占的比例将增大，使电动机实际得到的电压减小，严重时将不能正常运行。

所以，当电动机和变频器之间的距离较远的情况下，应考虑适当加粗变频器的输出线。一般要求，线路电压降：

$$\Delta U \leqslant 2\% \sim 3\% U_{PHN} \tag{2-7}$$

式中　ΔU——线路电压降（V）；

U_{PHN}——变频器的额定相电压（V）。

问题 30　变频器与电动机之间的距离最多允许多远？

由于变频器的输出电压是高压脉冲系列，其频率等于载波频率，峰值等于直流回路电压（513V），当变频器和电动机之间的连接线很长时，导线的分布电感和线间分布电容的作用将不可忽视。当电动机和变频器之间的距离较远时，线间的分布电容和电动机的漏磁电感之间有可能因接近于谐振点而导致电动机的输入电压偏高，从而使电动机容易损坏，或运行时发生振动。

由于不同变频器内部的处理方法不同（例如当上下两管交替导通时死区时间的设置等），规定距离也各不相同。几种常用变频器的规定见表 2-4。

表 2-4　不同变频器对电动机距离的规定

变频器型号	相关条件	规定距离/m
森兰 SB40	$f_C \leqslant 3$kHz	≤100
	$f_C \leqslant 7$kHz	<100
	$f_C \leqslant 9$kHz	<100
康沃 CVF-G2		≤30
英威腾 INVT-G9	$f_C \leqslant 5$kHz	≤100
	$f_C \leqslant 10$kHz	<100
	$f_C \leqslant 15$kHz	<100
惠丰 HF-G		≤200
艾默生 TD3000		≤100
富士 G11S	$P_N \leqslant 3.7$kW	<50
	$P_N > 3.7$kW	<100
日立 SJ300		≤20
三菱 FR-540	$P_N \leqslant 0.4$W	≤300
	$P_N \geqslant 0.75$W	≤500
安川 CIMR-G7	$f_C \leqslant 5$kHz	≤100
	$f_C \leqslant 10$kHz	<100
	$f_C \leqslant 15$kHz	<50
ABB ACS800 直接转矩控制	$R_2 \sim R_3$ 外壳	≤100
	$R_4 \sim R_6$ 外壳	≤300
ABB ACS800 标量控制	R_2 外壳	≤150
	$R_3 \sim R_6$ 外壳	≤300
瓦萨 CX	$P_N \leqslant 1.1$W	≤50
	$P_N = 1.5$W	≤100
	$P_N \geqslant 2.2$W	≤200

注：表中数据都来自于各变频器的说明书。

问题 31　电动机和变频器之间的距离较远时应采取哪些措施?

当电动机和变频器之间的距离较远时，为了避免电动机的不正常运行，可以采取在变频器的输出侧接入输出电抗器的方法，如图 2-15 所示。

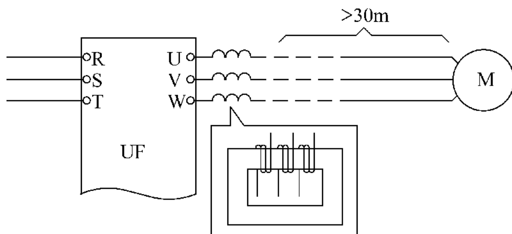


图 2-15　接入输出电抗器

如电动机的容量较小，与变频器的距离又并不很远时，则将变频器的三根输出线按同方向一起绕制在高频磁心上就可以了。

2.4　改善功率因数的配件

问题 32　采用了变频器后功率因数究竟是高还是低?

变频器输入侧的功率因数是较低的，但并不是由于 $\cos\varphi$ 的原因。说明如下：

1. 变频器输入电流波形　如前述，“交-直-交、电压型”变频器的输入侧是整流和滤波电路。显然，只有当电源线电压的瞬时值 u_L 大于电容器两端的直流电压 U_D 时，整流桥中才有充电电流。因此，充电电流总是出现在电源电压的振幅值附近，呈不连续的脉冲形状，如图 2-16a、b 和 c 所示。它具有很强的高次谐波成分。有关资料表明，输入电流中的 5 次谐波和 7 次谐波分量是很大的，其谐波分析如图 2-16d 所示。

2. 功率因数的定义与分析

（1）功率因数的定义　电路所消耗的平均功率和视在功率之比称为功率因数：

$$\lambda = \frac{P}{S} \tag{2-8}$$

式中　λ——功率因数；

P——平均功率（kW）；

S——视在功率（kVA）。

功率因数小于 1 的根本原因，是出现了无功功率的缘故。

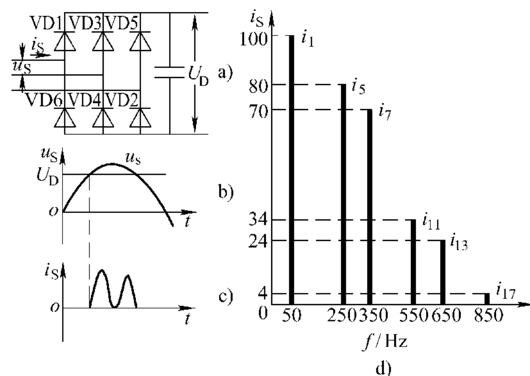


图 2-16　输入电流的波形及其谐波分析

a）电路　b）电压波　c）电流波　d）谐波分析

（2）电流与电压频率相同时的平均功率　当电流和电压的频率相同时，功率因数的大小取决于电流与电压之间的相位关系。

如图 2-17a，假设电流比电压滞后 φ 角：

$$\varphi = 2\pi ft = \omega t \tag{2-9}$$

式中　φ——功率因数角，即电流比电压滞后的电角度；

f——电流的频率（Hz）；

t——时间（s）；

ω——角频率。

功率的瞬时值 p 等于电压 u 和电流 i 瞬时值的乘积：

$$p = ui \tag{2-10}$$

由图知：

在 $0 \sim t_1$ 段：u 为“+”，i 为“-”。所以，p 为“-”值；

在 $t_1 \sim t_2$ 段：u 和 i 都为“+”。所以，p 为“+”值。

下半周也一样。

可见，平均功率被滞后时段内的负功率抵消掉一部分。正、负抵消的功率称为无功功率。滞后角越大，无功功率也越大，平均功率越小。

滞后角的余弦 $\cos\varphi$ 称为位移因数。

（3）高次谐波电流的平均功率　以 5 次谐波电流为例，它所消耗的功率瞬时值的大小等于 5 次谐波电流瞬时值和电压瞬时值的乘积：

$$p_5 = ui_5$$

式中　p_5——5 次谐波电流的功率瞬时值（kW）；

i_5——5 次谐波电流的瞬时值（A）。

由上式算得的功率曲线如图 2-17b 所示。由图知，瞬时功率的一部分为“+”，另一部分为“-”。可以证明，在一个周期内，正功率的总和与负功率的总和正好相等，平均功率等于 0。

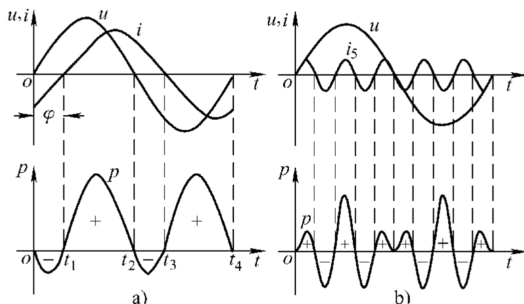


图 2-17　电路消耗的瞬时功率

a）电流滞后的特点　b）谐波电流的特点

所以，所有高次谐波电流的平均功率都等于 0，都是无功功率。

非正弦电流中，高次谐波电流所占的比例，称为畸变因数，等于电流基波分量的有效值与总有效值之比：

$$\nu = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_7^2 + \cdots}} \tag{2-11}$$

式中　ν——畸变因数；

I_1——电流基波分量的有效值（A）；

I_5、I_7、…——分别是 5 次谐波电流、7 次谐波电流、…的有效值（A）。

（4）完整的功率因数定义

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = \nu\cos\varphi \tag{2-12}$$

式中　λ——功率因数；

$\cos\varphi$——位移因数。

3. 变频器输入侧的功率因数　变频器中，输入电流的基波分量基本上与电压同相，故 $\cos\varphi \approx 1$；但电流的畸变因数较低。所以，变频调速系统的功率因数较低，约为 0.7～0.75。

因此，用功率因数表来测量变频器输入侧的功率因数是不正确的。因为，功率因数表是根据电动式偶衡表的原理制作的，其偏转角与同频率电压和电流间的相位差有关。但对于高次谐波电流，则由于它在一个周期内所产生的电磁力将互相抵消，对指针的偏转角不起作用。所以，功率因数表的读数将反映不了畸变因数的问题。

问题 33　为什么不用电容器而用电抗器来改善功率因数？

过去，在正弦电流的网络里，人们习惯于通过并联电容器来改善功率因数。这是因为，在正弦电流网络里，功率因数低的原因只有位移因数这一个方面，不存在畸变因数的问题（$\nu = 1$）。所以，通过并联电容器，可以减小合成电流的滞后角（φ 角），从而提高了 $\cos\varphi$。

但在变频器的输入侧，功率因数低并不是因为电流滞后形成的，而是高次谐波电流形成的。所以，要改善功率因数，必须对症下药，削弱高次谐波电流。具体方法有：

1. 接入交流电抗器　交流电抗器 AL 接在电源和整流桥之间，如图 2-18a 所示，其外形如图 b 所示。

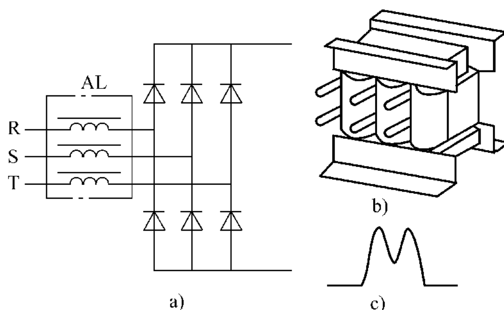


图 2-18　接入交流电抗器

a）在电路中的接法　b）外形　c）电流波形

接入交流电抗器后的电流波形如图 c 所示，功率因数可提高到 0. 85 以上。

2. 接入直流电抗器　直流电抗器 DL 接在整流桥和滤波电容器之间，如图 2-19a 所示。其外形如图 b 所示。

接入直流电抗器 DL 后的电流波形如图 c 所示，功率因数可提高到 0. 9 以上。由于其体积较小，故不少变频器已将直流电抗器直接装在变频器内。

直流电抗器除了提高功率因数外，还可削弱在电源刚接通瞬间的冲击电流。

如果同时配用交流电抗器和直流电抗器，则可将变频调速系统的功率因数提高至 0. 95 以上。

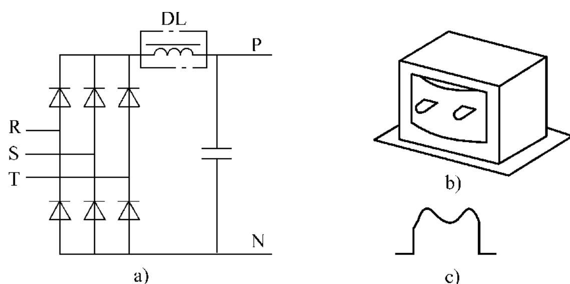


图 2-19　接入直流电抗器

a）在电路中的接法　b）外形　c）电流波形

问题 34　什么是 12 脉波整流？有什么好处？

1. 12 脉波整流的特点　在变频器的输入侧增加了一个三绕组变压器，两个二次绕组中，一个接成 Y 形，另一个接成△形。两个二次绕组分别进行全波整流，分别得到 6 脉波的电压，如图 2-20 中之曲线②和曲线③所示。但两者之间互差 π/6（30°）电角度，并联后就得到 12 脉波的直流电压，如曲线④所示。

2. 12 脉波整流的好处

（1）输入电流的波形十分接近于正弦波，如图中之曲线①所示，从而可以将功率因数提高到 0. 95 以上；

（2）十分有利于抗干扰；

（3）直流电压的纹波大为减小，有利于滤波。

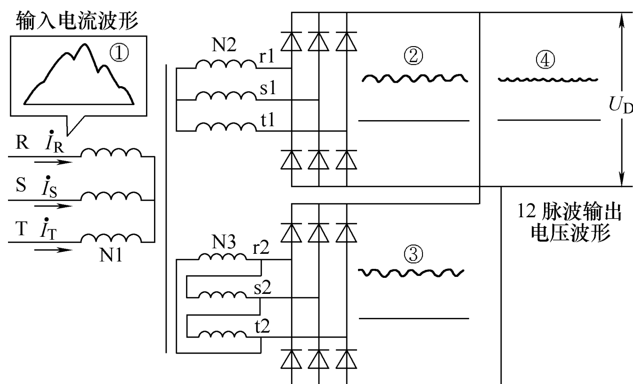


图 2-20　12 脉波整流

问题 35　在变频调速系统中，电动机的功率因数是否无关紧要？

这个问题要从两个方面来说明：

1. 调速系统的功率因数不受电动机影响　因为变频器内部，有一个直流环节，把输入侧和输出侧隔开了。所以，电动机功率因数的好坏，对输入侧是毫无影响的。

2. 电动机的功率因数影响自身效率　由于电动机电流基本上是正弦波，故可以仍按照正弦波的方法进行分析。如图 2-21 所示，在电流的有功分量 I_{1a}相等的前提下，cosφ 越低（φ 角越大），则定子电流越大，定子的铜损也必增大，效率也越低。具体分析如下：

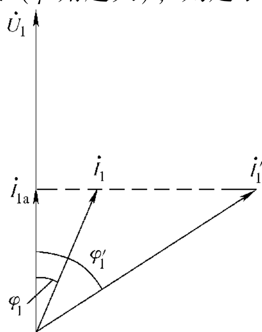


图 2-21　电流与功率因数

当功率因数角为 φ_1（功率因数为 cosφ_1）时，所需电流是 I_1；而当功率因数角为 φ_1'（功率因数为 cosφ_1'）时，所需电流是 I_1'。由图知：

$$\varphi_1' > \varphi_1 \rightarrow \cos\varphi_1' < \cos\varphi_1 \rightarrow I_1' > I_1 \rightarrow I_1'^2 r_1 > I_1^2 r_1 \rightarrow \eta' < \eta$$

式中　$I_1^2 r_1$——定子铜损，kW；

η——电动机的效率。

尤其是在变频调速的情况下，电压与频率之比是可以任意设定的。如设定不当，或在运行过程中负载的波动较大，容易发生电动机磁路饱和，励磁电流增大的现象。结果是电动机的功率因数下降，效率降低。应注意改善电动机的功率因数，但不是通过并联电容器来解决的。

问题 36　能不能通过在变频器的输出端加电容器来改善功率因数？

不能，原因如下：

1. 变频器输出侧不允许接电容器　由于变频器在运行过程中，各桥臂的两个逆变管处于不断地交替导通的状态。因此，如果在输出端接入了电容器，如图 2-22 所示。则逆变管在交替导通过程中，电容器将不断地充电和放电。使逆变管在向电动机提供电流的同时，又增加了电容器的充电电流和放电电流，导致损坏逆变管。

所以，在变频器的输出侧是不允许接入电容器的。

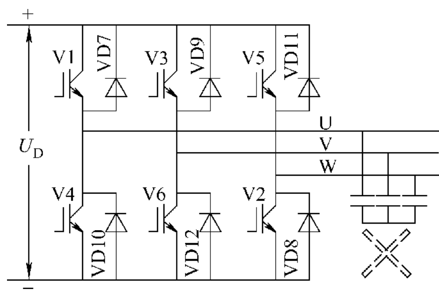


图 2-22　输出侧不允许接电容器

2. 并联电容器无作用　这也有两方面的原因：

（1）并联电容器不能改善输入侧的功率因数　因为变频器内部的直流环节，把输入侧和输出侧隔开了，故输出侧功率因数的好坏，对输入侧并无影响。

（2）并联电容器也不能提高电动机的效率　并联电容器的意义是：由电容器向电动机提供一部分无功电流，从而减小了电动机向电源取用的无功电流。但并联电容器并不能减小电动机本身的无功电流。所以，对提高电动机的效率也无作用。

问题 37　增加补偿电容为什么不能改善功率因数？

所谓补偿电容，是指在变电所内与变压器直接相接的电容器。如上述，因为变频调速系统的功率因数低，主要是因高次谐波电流造成的。因此，增加补偿电容是不起作用的。

在网络容量不够大的情况下，变频器输入侧的高次谐波电流将使网络电压增加了高频脉动的成分。电容器在高频脉动电压的作用下，

寿命有可能缩短。

问题 38　交流电抗器和直流电抗器哪个效果好?

交流电抗器在进线侧要产生电压降 U_{AL}，而变频器输入端的电压不应低于电源额定电压的（95% ~98%）：

$$U_{SI} \geqslant (95\% \sim 98\%) U_{SN}$$

式中　U_{SI}——变频器进线处额定电压（V）；

U_{SN}——电源额定电压（V）。

所以，交流电抗器的电感量是受到限制的（见图 2-23）。因此，单就改善功率因数的效果而言，交流电抗器略低于直流电抗器。

但交流电抗器除了改善功率因数外，还有其他独特的功能，如：

（1）削弱冲击电流　电源侧短暂的尖峰电压可能引起较大的冲击电流。交流电抗器将能起到缓冲作用。例如，在电源侧投入补偿电容（用于改善功率因数）的过渡过程中，可能出现较高的尖峰电压等；

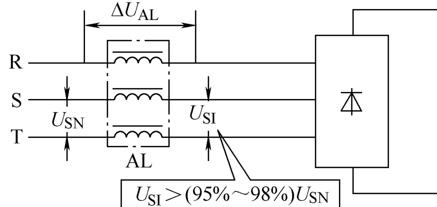


图 2-23　交流电抗器的制约

（2）削弱三相电源电压不平衡的影响。

问题 39　还有哪些情况需要接入交流电抗器?

除了改善功率因数外，需要接入交流电抗器的场合如图 2-24 所示，说明如下：

1. 同一电路中有多台变频器　当同一电路中有多台变频器运行时，电路的电压波形将发生畸变，有可能导致其他设备运行不正常，以及变频器的不规则跳闸。故每台变频器的输入侧都应接入交流电抗器，如图 2-24a 所示。

2. 变压器的容量很大　如果变压器和变频器容量接近，变压器本身的绕组电感可以部分地起到交流电抗器的作用。

但当变压器容量超过变频器容量 10 倍以上时，变压器本身的绕组电感相对很小。所以，变频器输入侧应接入交流电抗器，如图 b 所示。

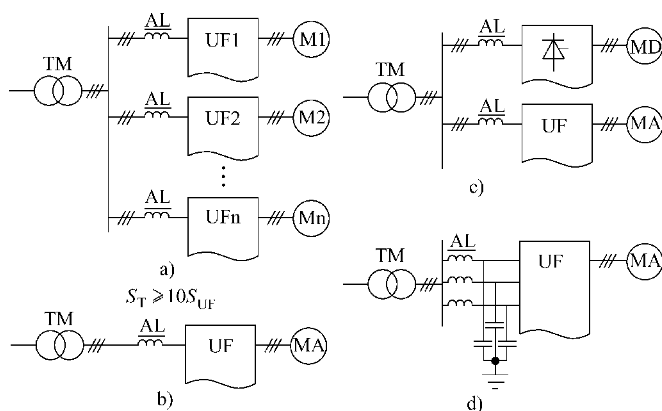


图 2-24　需要接入交流电抗器的场合

a）同一电路中有多台变频器　b）变压器容量很大

c）同一电路中有晶闸管设备　d）对抗干扰要求较高

3. 同一电路中有容量较大的晶闸管设备　因为晶闸管设备也容易使电网的电压波形发生畸变，和变频器互相影响。所以，变频器输入侧和晶闸管设备的输入侧都应接入交流电抗器，如图 c 所示。

4. 变频器对其他设备干扰较严重　如果变频器的容量较大，或同一网络中电子设备较多，要求变频器减小高次谐波电流时，应在变频器输入侧接入交流电抗器和电容器进行滤波，如图 d 所示。

电容器可按 0.1 ~ 0.22μF，1000V 选择。

5. 线路电压不平衡　变频器三相整流桥在运行过程中，由于每相电压接近振幅值时，滤波电容器上的电压并不恒定，因此，三相充电电流的大小常常是不平衡的。

线路电压的不平衡，将导致变频器三相输入电流的更加不平衡。所以，当三相电压的不平衡度 >3% 时，应考虑接入交流电抗器。

问题 40　怎样选择电抗器?

1. 交流电抗器的选择原则

（1）基本原则　当输入电流等于额定值时，交流电抗器上的电压降应不超过额定电压的（2 ~ 5)%。

（2）计算公式

$$L=\frac{(2\sim5)\%U_N}{2\pi fI_N} \tag{2-13}$$

式中　L——交流电抗器的电感量（H）；

U_N——变频器的额定电压（V）；

I_N——变频器的额定电流（A）；

f——电源频率（Hz）。

2. 常用电抗器的规格

（1）交流电抗器的规格（见表 2-5）

表 2-5　常用交流电抗器的规格

电动机容量/kW	30	37	45	55	75	90	110	132	160	200
允许电流/A	60	75	90	110	150	170	210	250	300	380
电感量/mH	0.32	0.26	0.21	0.18	0.13	0.11	0.09	0.08	0.06	0.05

（2）直流电抗器的规格（见表 2-6）

表 2-6　常用直流电抗器的规格

电动机容量/kW	30	37 ~ 55	75 ~ 90	110 ~ 132	160 ~ 200	220
允许电流/A	75	150	220	280	370	560
电感量/μH	600	300	200	140	110	70

问题 41　怎样自制小容量交流电抗器？

容量较小的交流电抗器，是可以自行制作的。制作时，需注意以下事项：

（1）只削弱高次谐波电流，三相的基波电流应不受影响；

（2）交流电抗器每相绕组的电压降不超过额定电压的 2% ~5%；

（3）三相绕组的结构应该完全相同；

（4）各相绕组之间必须可靠绝缘。

今以 1.5kW 变频器为例，说明如下：

找一个废旧铁心，将三个绕组按同方向绕在同一个铁心柱上，如图 2-25 所示。这样，三相基波电流的磁通将互相抵消，所以对基波电流并无阻碍作用。

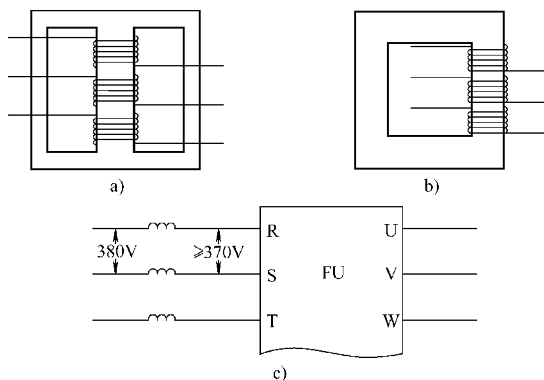


图 2-25　自制交流电抗器

a）三柱铁心　b）单柱铁心　c）允许压降

导线的粗细：以康沃 CVF-G2 变频器为例，1. 5kW 变频器的额定电流是 3. 7A，则安全载流量可按 5 ~ 10A 计，选 0. 75 ~ 1mm^2 的绝缘线即可。

线圈的匝数：难以准确估算，可以适当多绕一些，必要时可多加几个中心抽头，以每相电压降不超过额定电压的 2% ~5% 为原则进行调整。粗略地说，如果进线端的线电压为 380V，则电抗器出线端的线电压只要不低于 370V 即可。

铁心大小：因为每相允许的电压降为 220 ×0. 03 =6. 6V；故铁心功率约为

$$P_{FE} \approx 3 \times 6.6 \times 3.7 = 73VA$$

由于铁心内的基波磁通已经抵消，故可以适当选小一些，选 50VA 照明变压器的铁心即可。

问题 42　输出电抗器有什么作用？

如图 2-26 所示，输出电抗器的作用主要是：

1. 抵消分布参数的作用　当电动机和变频器之间的距离很长（ >50m）时，导线与导线之间的分布电容 C_0 较大，将导致许多不正常现象，例如，电动机侧电压升高、电动机发生振动以及在加、减速过程中变频器容易跳闸等。接入输出电抗器，将能较好地抵消分布电容的作用。

2. 削弱谐波电流　变频器的输出电流中，含有与载波频率相同的谐波成分，因为频率很高，故具有较强的辐射能，干扰其他设备的正常工作。输出电抗器能够比较有效地削弱谐波电流。

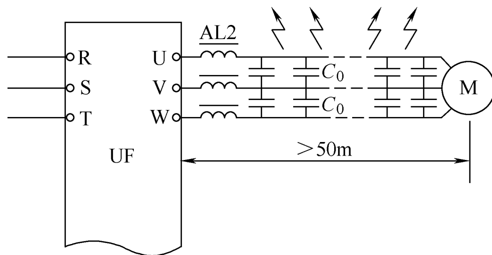


图 2-26　输出电抗器的作用

问题 43　输出电抗器发热严重是什么原因？能否缓解？

输出电抗器发热主要是铁心材料的问题。因为输出电流中，高次谐波电流的频率很高，而普通硅钢片的磁滞回线不能适应高频磁场，故铁损很大，导致铁心发热。解决的办法：

（1）把三根输出线同方向在高频磁心上绕若干匝，来代替输出电抗器，如图 2-27b 所示。如果输出线较粗，难以在磁心上绕制时，可以将三根输出线同时穿过多个磁心，如图 c 所示。

（2）将上述自制的高频电感与输出电抗器串联，能缓解输出电抗器的发热，如图 a 所示。

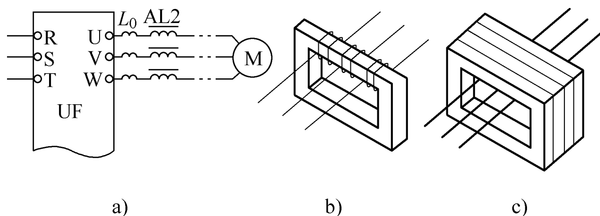


图 2-27　输出电抗器的改善

a）接入高频电感　b）绕 2 匝　c）穿过 4 个磁心

2.5　抗干扰的配件

问题 44　变频器有哪些干扰源?

如图 2-28 所示，变频器的干扰源主要有：

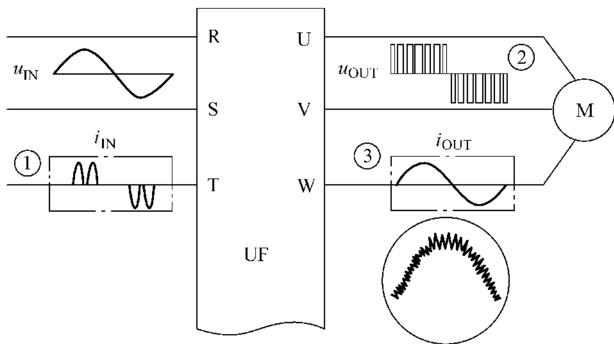


图 2-28　变频器的干扰源

1. 输入电流　输入电流为非正弦波，如图 2-28 中之①所示。它具有十分丰富的高次谐波成分。它的干扰方式主要有两种：

（1）使网络电压发生畸变；

（2）频率较高的谐波电流具有电磁幅射的能力。

2. 输出电压　输出电压的波形是经过正弦脉宽调制的高频脉冲序列，如图 2-28 中之②所示。它主要是通过线路的分布电容“窜入”其他设备产生干扰。

3. 输出电流　输出电流中具有频率很高（等于载波频率）的高次谐波成分，如图 2-28 中之③所示，故电磁幅射的能量较大。

问题 45　变频器通过哪些途径干扰其他设备?

干扰信号的主要传播途径有以下几种：

1. 线路传播

（1）通过电源线路传播　由于变频器的输入电流中有很强的高次谐波成分，使网络电压产生相应的脉动，从而传播到同一网络上的其他电子设备，如图 2-29a 中之途径①所示；

（2）通过地线传播　如果若干设备的地线联接在一起的话，则变频器输出电流中的高频信号将通过地线传播到其他设备，如图 2-

29a 中之途径②所示。

2. 电磁波传播　因为变频器的输入电流和输出电流中都有频率较高的高次谐波成分，高次谐波电流所产生的电磁场具有幅射功能。使其他设备（尤其是通讯设备）因接收到电磁波信号而受到干扰，如图 2-29b 所示。

谐波电流的频率越高，则幅射能越强，但传播的距离则越短。反之，谐波电流中的频率较低者，产生的幅射能较弱，但传播的距离则较远。

3. 电磁感应传播　当其他设备的控制线接近变频器的主电路（输入或输出）时，将切割主电路所产生的高频电磁场而产生干扰信号，如图 2-29c 所示。

4. 静电感应传播　当其他设备的控制线接近变频器的输出主电路时，变频器输出的高频电压信号，将通过线间的分布电容，传播到其他设备中去，如图 2-29d 所示。

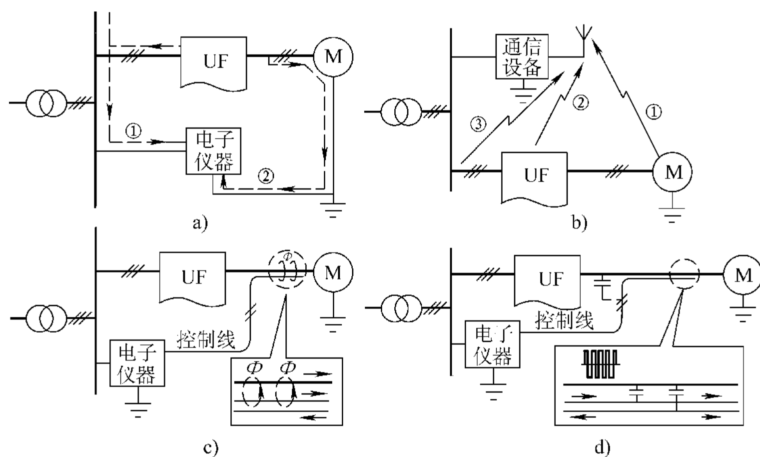


图 2-29　干扰的途径

a）线路传播　b）电磁波传播　c）电磁感应　d）静电感应

问题 46　怎样防止线路传播引起的干扰？

线路传播常常是比较主要的干扰途径，防止的方法主要有：

1. 电源隔离　电源隔离是防止线路传播的最为有效的方法，有

两种情形：

（1）在变频器的输入侧加入变压器隔离，如图 2-30a 中之①所示。上述的 12 脉波整流中的三绕组变压器，也是其中之一。

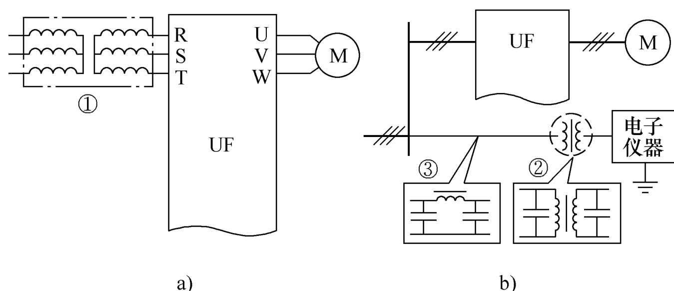


图 2-30　滤波和隔离

（2）受干扰设备为小容量电子仪器时，则在受干扰设备前，接入隔离变压器，如图 b 中之②所示。

2. 加入滤波电路　如图 b 中之③所示。图中，电容器的容量视干扰程度而定。一般情况下，可选(0.47 ~ 2)μF，耐压应≥1000V。

3. 正确接地　如果把各种电子设备的地线连接到一起后再接地，则地线为相互间传播干扰信号提供了路径。

正确的接地方法应该是每个设备都单独接地。

问题 47　买不到隔离变压器，怎么办？

可以购买两台降压变压器，高压侧的额定电压应与受干扰设备控制电路所要求的电压相符；低压侧的电压不限，但两台变压器必须相同。

如图 2-31 所示，将两台变压器 T1、T2 的低压侧对接，则变压器的输出侧和输入侧之间便被隔离了。

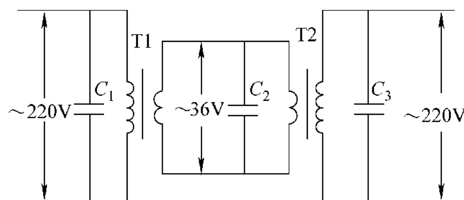


图 2-31　自制隔离变压器

为了增强隔离效果，可在变压器的输入和输出侧接入滤波电容器。电容器的容量通常可取(0.1 ~ 1) μF；当高压侧的电压为 220V 时，C_1 和 C_3 的耐压应大于或等于 1000V；低压侧的电压如为 36V，则 C_2 的耐压应大于或等于 150V。

问题 48　怎样防止电磁辐射引起的干扰？

1. 加强屏蔽

（1）加强变频器的屏蔽　变频器的外壳本身也具有屏蔽作用。此外，如有条件，最好把变频器放在控制柜内，可以加强屏蔽；

（2）加强主电路的屏蔽　因为高次谐波电流要通过主电路，所以，主电路也是幅射源。应该把主电路的导线穿在金属管内，进行屏蔽；

（3）加强受干扰设备的屏蔽　尽量把受干扰的设备放置在金属箱（或金属柜）内，以削弱进入受干扰设备的电磁波强度。

2. 降低载波频率　由于变频器的输出电流中高次谐波的频率与载波频率相同，频率高，幅射能力强。故变频器的幅射干扰多数是由输出电流引起的。适当降低载波频率，可以降低变频器输出电流的幅射强度。

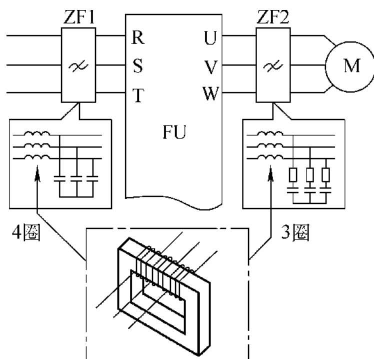


图 2-32　滤波器及接法

3. 屏蔽层良好接地　所有的金属外壳，主电路的金属管等，都必须良好接地。

4. 接滤波器　滤波器主要用于抑制具有辐射能力的频率很高的谐波电流，串联在变频器的输入和输出电路中，如图 2-32 所示。

滤波器主要由线圈和电容器组成，必须注意的是：变频器输出侧的滤波器中，其电容器只能接在电动机侧，且应串入电阻，以防止逆变管因电容器的充、放电而受到冲击。

滤波器内线圈的结构如图中虚线框内所示，由各相的连接线在同一个高频磁心上按相同方向绕 4 圈（输入侧）或 3 圈（输出侧）构成。要点如下：

（1）三相的连接线必须按相同方向绕在同一个磁心上，使基波电流的合成磁场为 0，因而对基波电流毫无影响；

（2）在一个磁心上绕 4 圈和在四个磁心上绕 1 圈是等效的。从而，可根据联接线的粗细灵活地决定其加工方法。

问题 49　输入和输出滤波器有什么区别？

主要区别有二：

1. 线圈的匝数不同　变频器输入电流中，高次谐波分量的频率并不很高，故输入滤波器线圈的匝数稍多；而输出电流中高次谐波分量的频率较高，等于载波频率，故输出滤波器线圈的匝数可略少。

2. 附加电路不同　为了提高滤波效果，各生产厂家往往在线圈两端加接电容器。但输出滤波器中，靠近变频器侧是不允许接电容器的。在电动机侧，即使接入电容器时，也应串入限流电阻，如图 2-33 所示。所以，输出滤波器在接线时，必须注意不能把变频器侧和电动机侧接反。

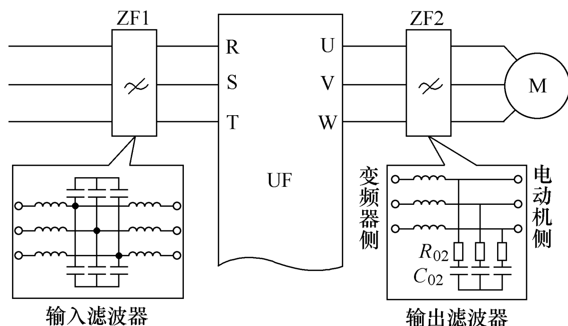


图 2-33　输入、输出滤波器

问题 50　输入滤波器与噪声滤波器有什么异同？

两者都用于削弱频率较高的谐波电流，防止通过电磁幅射干扰附近设备的工作。区别在于：

1. 结构上的区别　输入滤波器的电路结构比较复杂，如图 2-34 中的 NF 所示（不同生产厂家的线路结构也不一样）；

噪声滤波器则通常由三个电容器构成，如图 2-34 中之 ZF 所示。由于结构简单，故也称为简易形滤波器。

2. 功能上的区别　输入滤波器针对的频带较宽，通常为：从无线电的调幅频率到 10MHz；

噪声滤波器针对的频带较窄，通常为 1MHz 左右。

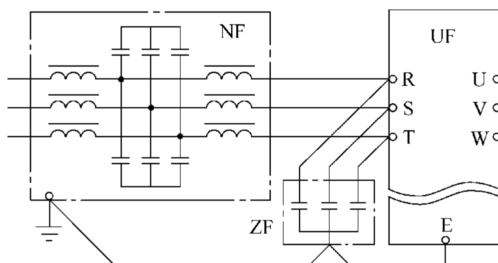


图 2-34　输入滤波器和噪声滤波器

问题 51　怎样防止因感应引起的干扰？

感应干扰主要发生在各种设备的控制线路中，防止的方法有以下几种：

1. 正确布线

（1）远离　所有的控制线都应该远离变频器的主电路，使它们不受主线路电磁场的影响；

（2）不平行　各种设备的控制线不要和变频器的主电路平行。

2. 滤波和隔离　模拟量控制信号大多是直流信号，故可以通过滤波和隔离的方法把由感应引起的附加高频信号削弱或消除。

由于滤波电路很难完全消除高频信号，加以电感线圈的电阻压降有可能削弱原来的信号，故必要时可用线性光电耦合管进行隔离和放大，如图 2-35a 所示。

3. 信号线相绞　因为感应电动势都呈回路状，信号线相绞后，可使相邻两个“绞圈”内的感应电动势互相抵消，如图 2-35b 所示。

4. 采用屏蔽线　屏蔽线内的金属屏蔽层，可以阻隔电磁信号的进入。一般情况下，金属屏蔽层只应一端接地，其正确处理方法如图 2-35c 所示。

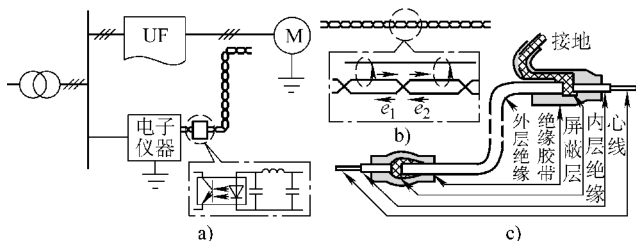


图 2-35　防止感应干扰的方法

a）信号隔离　b）控制线相绞　c）屏蔽层的处理

问题 52　变频器相互间是否干扰？

多台变频器之间也可能互相干扰，一般说来，大致有两种情况：

1. 多台变频器在同一控制柜中　同一控制柜内多台变频器相互干扰的结果往往是各台变频器都不能正常工作。大多属于感应干扰。解决的方法有：

（1）从控制线布线入手　使各变频器控制线远离其他变频器的主电路，防止与其他变频器的主电路平行布线；

（2）从主电路入手　控制柜内使用金属配电板，所有变频器的主电路都从板后走线，如图 2-36 所示。

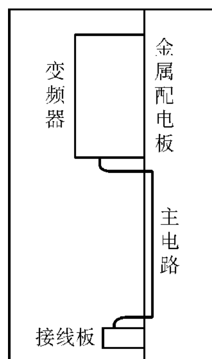


图 2-36　主电路隔离

2. 变频器在同一电路中　多台变频器在同一电路中时，容易使线路电压的波形发生畸变，导致变频器因“过压”或“欠压”而误动作（跳闸）。具体情况也有两种：

（1）变频器容量大台数少　大容量变频器在运行时，线路电压有可能发生严重畸变。在这种情况下，所有变频器都应配置交流电抗器。

（2）变频器容量小台数多　当线路中有很多小容量变频器同时运行时，线路电压的波形虽不一定发生严重畸变，但有许多维持时间很短（微秒级）的“毛刺”，导致各变频器不规则跳闸。

解决的方法最好是在每个变频器的输入侧都接滤波器。也可以通

过预置变频器的“重合闸”功能来防止变频器停机。

问题 53　怎样防止外部脉冲对变频器的干扰?

1. 外部脉冲的来源　主要有两种:

(1) 大电流开关在断开时的电弧，因为过程快，故频率高，具有较强的辐射能，如图 2-37a 所示。

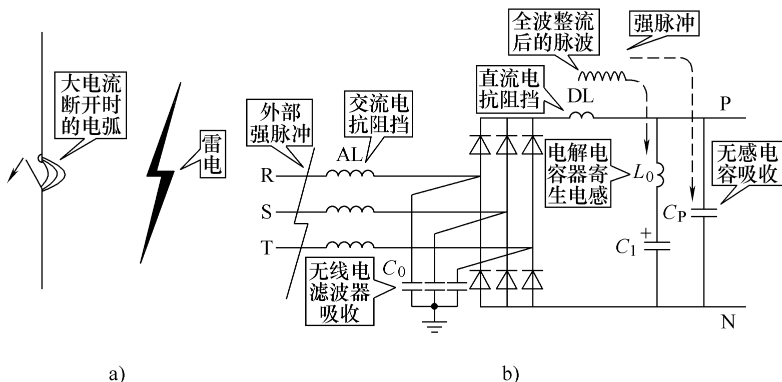


图 2-37　外部脉冲及其削弱
a) 外部脉冲　b) 削弱外部脉冲的方法

(2) 雷电。

2. 削弱外部脉冲的方法　主要是两个方面:

(1) 电感拦截　即利用电抗器来削弱外来的高频脉冲。在变频器外部，由交流电抗器来削弱；在变频器内部，由直流电抗器来削弱。

(2) 电容吸收　利用电容器来吸收外来的高频脉冲。在变频器外部，由无线电滤波器来吸收；在变频器内部，则在滤波电容器旁并联无感小电容来吸收。电解电容器是有寄生电感的，对于高频脉冲，非但不能吸收，反而还要阻挡，故对于窜入变频器的外部高频脉冲，只能由无感小电容来吸收，如图 b 所示。

2.6　变频器的测量

问题 54　变频器的哪些参数可以用常规仪表进行测量?

工厂里常用的电流表和电压表一般都是电磁式仪表，其符号如

图 2-38 虚线框中所示。在变频调速系统中可用的场合有：

（1）变频器的输入电压　输入电压也就是网络电压，是比较完整的正弦波，故可用。

（2）输入电流　对于小容量变频器，难免把电流表直接串联在电路内者，读数是准确的。但对于大容量变频器，须通过电流互感器来测量者，读数有误差，如后述。

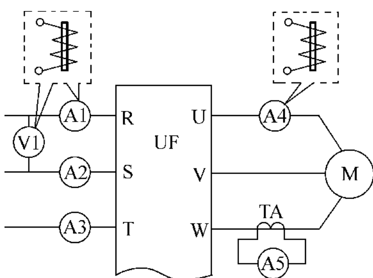


图 2-38　可用常规仪表的场合

（3）输出电流　输出电流中虽然也有谐波分量，但幅值很小，故即使通过电流互感器来测量，误差也不大。

问题 55　输出电压波的脉冲高度是 U_D，为什么仪表读数不是 U_D?

因为变频器的输出电压是正弦脉宽调制后的系列脉冲，如图 2-39b 和 c 所示。其特点是：

（1）电压脉冲的幅值不变，等于直流电压：

$$U_M = U_D$$

式中　U_M——电压脉冲的幅值（V）；

U_D——变频器内直流回路的电压（V）。

（2）输出电压的大小是通过改变脉冲的占空比来进行调节的。比较图 b 和图 c 可知：

当输出电压 $U_X = 380V$ 和 $U_X = 250V$ 时，脉冲的幅值都等于 $U_{XM} = U_D = 513V$。但 $U_X = 380V$ 时的占空比较大，故平均电压较大；而 $U_X = 250V$ 时的占空比则较小，故平均电压也较小。

电压表的读数是和电压的平均值成正比的，所以不等于直流电压。

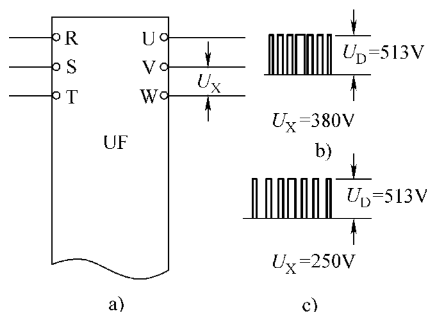


图 2-39　变频器的输出电压

a）变频器的外接主电路　b）380V 时的波形　c）250V 时的波形

问题 56　能不能用电磁系仪表测量输出电压？

1. 电磁系仪表的构造和原理　电磁系仪表的基本结构如图 2-40 所示。图中，1 是线圈，是固定的；2 是铁心，是带动指针旋转的（为简明起见，图中所画为吸入式，实际应用中，更多的是推斥式），3 是指针。

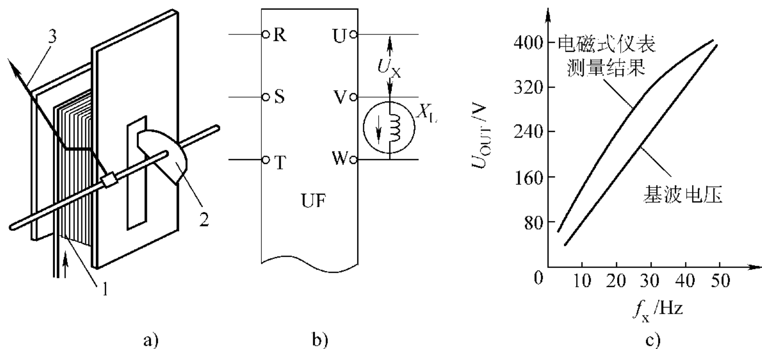


图 2-40　电磁系仪表测电压
a）电磁式仪表构造　b）测电压的特点　c）测量结果

当线圈中通入与被测量成正比的电流后，铁心被吸入，并带动指针偏转，被测量越大，偏转角也越大。

电磁系仪表的主要优点是偏转部分不必通入电流，这使它的结构比较简单、坚固。又由于其偏转角与电流的二次方成正比，可以十分方便地测量交变量。因此，在工程应用中，电磁式仪表应用得比较普遍。

2. 电磁系电压表的特点　电磁系仪表在制作成电压表时，为了减小其取用电流，线圈的圈数很多，故电感量较大。在工频电路中进行测量时，因为各处的频率都相同，线圈的感抗也一样。所以，流经线圈的电流与被测电压成正比，可以保证足够的测量精度。

3. 电磁系电压表测量变频电压的结果　当电磁系仪表测量变频器的输出电压时，因为线圈的感抗是和频率成正比的：

$$X_{LX} = 2\pi f_X L \tag{2-15}$$

式中　X_{LX}——频率为 f_X 时的感抗（Ω）；

f_X——工作频率（Hz）；

L——线圈的电感（H）。

当工作频率 f_X 下降时，感抗 X_{LX} 也随着减小，在相同的被测电压下，线圈中的电流将增大，从而指针的偏转角和仪表读数偏大，如图 2-40c 所示。

所以，电磁系仪表用来测量变频器的输出电压时，误差较大。

问题 57　为什么不能用数字式仪表测量输出电压？

1. 数字式仪表的测量原理　数字式仪表中并无线圈，其主要测量方法是利用一系列频率固定的采样脉冲，对被测量进行“采样”，如图 2-41b 所示。每隔一段时间（如 50Hz 的一个周期或半个周期）计算一次采样结果的平均值，得到与被测量成比例的数值，作为其测量结果。

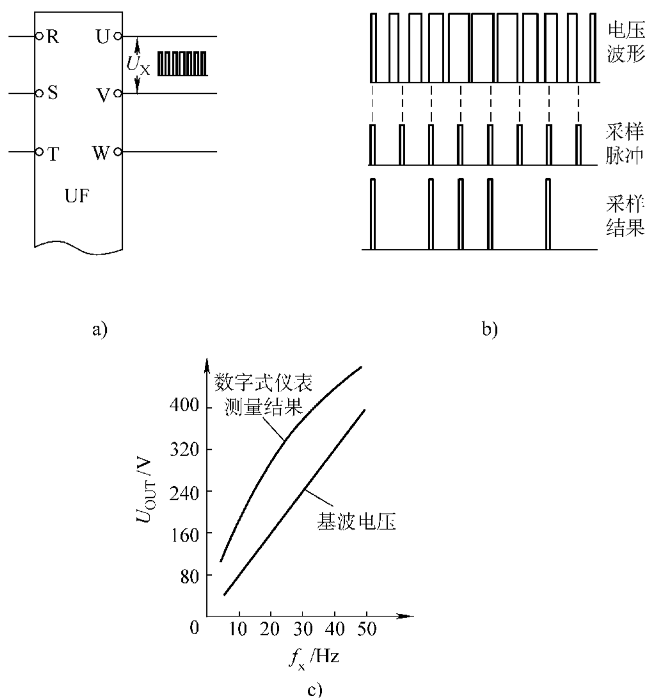


图 2-41　数字式仪表测变频器输出电压

a）变频器电路　b）数字式仪表测量过程　c）测量结果

2. 数字式电压表测量变频电压的结果　由于变频器的输出电压是通过改变占空比来调节其平均电压的，而数字电压表所发出的采样脉冲的宽度和频率是固定不变的。当它测量变频器的输出电压时，有时采样脉冲正好和输出电压脉冲重合，采样结果为直流电压值 U_D；有时采样脉冲和电压脉冲错开了，采样结果为 0V。

因为变频器输出电压的占空比是随着给定频率和所预置的 U/f 比而变化的。当频率下降，输出电压减小时，电压脉冲的占空比减小，电压表采样到的次数减少。但每次采样到的电压都是直流电压值 U_D，故测量结果偏大，如图 2-41c 所示。

问题 58　为什么用整流系仪表测量变频器的输出电压是比较准确的？

所谓整流式仪表是由磁电式仪表和整流桥组成的，说明如下：

1. 磁电式仪表的构造和原理　磁电式仪表的基本结构如图 2-42a 所示。图中，1 是永久磁铁，是固定的；2 是线圈，是带动指针旋转的，3 是铁心，用于增强磁路的磁通；4 是指针。

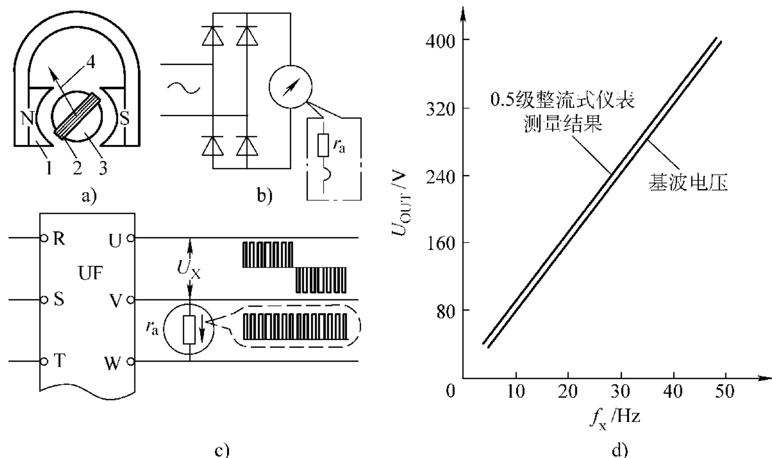


图 2-42　整流式仪表测电压

a）磁电式仪表　b）整流式仪表　c）测量交流电压　d）测量结果

当线圈中通入与被测量成正比的电流后，将受到磁场的作用力而转动，并带动指针偏转，偏转角与线圈内电流的平均值成正比。磁电

式仪表在进行测量时，有以下特点：

（1）只能测量直流电流和电压　当流经线圈的电流方向改变时，线圈的受力方向也将改变。因此，如果通入线圈的电流是交变电流的话，指针将不偏转。所以，磁电式仪表是不能用来测量交流电压和电流的。

（2）测电压时必须加附加电阻　由于磁电式仪表的偏转部分是线圈，故测量电压时，不能象电磁式仪表那样大量增加线圈的匝数。而必须依靠串联一个阻值很大的附加电阻 r_A 来减小取用电流。

2. 整流式仪表及其功用　所谓整流式仪表，就是把交变电压经整流后再通入磁电式仪表，是用磁电式仪表来测量交流电的一种方式，如图 2-42b 所示。由于线圈的匝数不多，故电感量小。当用来测量交流电压时，因为串联了阻值很大的附加电阻 r_A，故整个测量电路基本上呈纯电阻性质。所以，利用它来测量变频器的输出电压时，流入线圈的电流波形基本上和电压波形相同，如图 2-42c 所示。利用这一特点，由整流式仪表来测量变频器的输出电压是比较准确的，其测量结果如图 2-42d 所示。由于变频器的输出电压中含有高次谐波成分，故测量结果与基波电压相比，略大一些。

需要注意的是，磁电式仪表的读数是和电流的平均值成正比的，要得到有效值，须进行必要的校准。

问题 59　市场上买不到整流系电压表怎么办？

可以自制，方法如下：

（1）在市场上购买一个磁电式的低压直流电压表，量程不限；

（2）找一个阻值较大的电位器 RP（500kΩ 左右）与电压表串联，开始时将 RP 调至最大值；

（3）用一个整流桥（击穿电压应≥1000V），其交流输入侧接至变频器的输出端，直流输出侧接至电压表和电位器的串联电路，如图 2-43 所示；

（4）变频器接通电源，将输出频率调至 50Hz。这时，变频器的输出电压应显示为 380V；

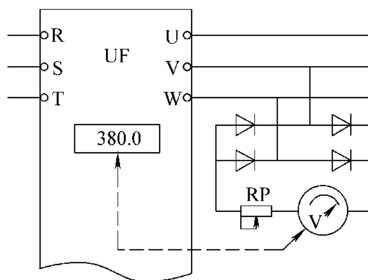


图 2-43　自制整流式电压表

（5）微微调节电位器 RP，使电压表的指针指最大量程处，则电压表的最大量程为 380V；

（6）测量电位器的阻值，用一个固定电阻取代电位器，并装入表内。

问题 60　用钳形电流表测量变频器的输入电流时，为什么读数偏小？

钳形电流表是通过电流互感器来进行测量的。而变频器的进线电流中具有十分丰富的谐波电流。

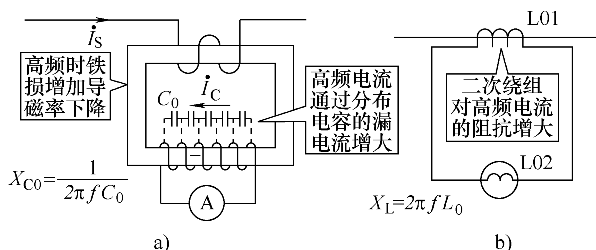


图 2-44　输入电流的测量

a）分布电容的影响　b）绕组电感的影响

当电流互感器测量谐波电流时，要受到以下几方面的影响：

1. 电的方面

（1）互感器二次绕组的线匝与线匝之间的分布电容对谐波电流呈现的容抗较小，漏电流增大；

（2）互感器二次绕组本身的感抗以及仪表线圈对谐波电流呈现的感抗增大，进一步削弱了谐波电流。

2. 磁的方面

（1）普通互感器铁心对于频率较高的谐波电流的磁场，导磁率将下降；

（2）谐波磁场的铁损（包括磁滞损失和涡流损失）增加。

从而，削弱了通过铁心传递到二次绕组的电磁功率。

上述几个方面的因素，都将削弱互感器二次电流中的谐波成分，使仪表的读数偏小。

问题 61　为什么输出侧可以用两表法测量三相电功率，输入侧却不能？

1. 电动式仪表　电动式仪表由两组线圈构成：固定线圈 1 和偏转线圈 2，指针 3 与偏转线圈同轴，如图 2-45a 所示。

当两个线圈中通入电流时，它们的磁场相互作用，使偏转线圈受力而旋转，偏转角与两线圈内电流的乘积成正比。

电动式仪表通常用来作为功率表。一般情况下，不动的线圈 1 为电流线圈，导线较粗，串联在被测电路中；偏转线圈 2 为电压线圈，导线较细，经串联附加电阻后跨接在被测电压两端，如图 2-45b 所示。

2. 变频器功率的测量　因为电动机的三相电流是平衡的，故可用两表法来测量三相电功率。

但三相整流桥的输入电流（即变频器的输入电流）常常是不平衡的，尤其是在负载较轻时。所以只能各相分别测量，再把测量结果相加，得到三相总功率：

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

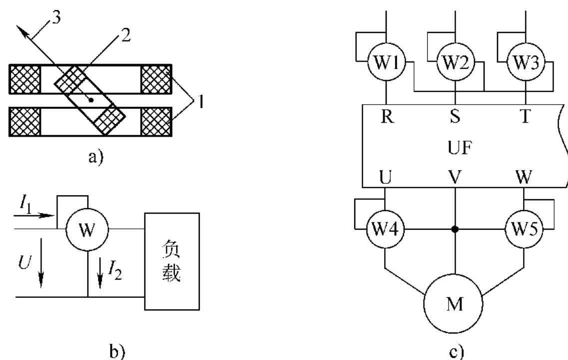


图 2-45　电动式仪表和功率测量

a）电动式仪表　b）测量功率接法　c）变频器输入输出功率的测量

问题 62　为什么不能用功率因数表测量变频器输入侧的功率因数？

1. 变频器输入侧的功率因数的特点

（1）畸变因数低　如问题 32 所述，变频器的输入电流中，高次

谐波成分很大。所以，变频器输入电流的畸变因数 ν 较低，导致功率因数降低。

（2）位移因数高　因为变频器输入电流的基波分量基本上是与电源电压同相位的，所以，其位移因数很高，几乎等于 1。

2. 功率因数表的测量结果　功率因数表是根据偶衡表的原理制作的，其偏转角与同频率电压和电流间的相位差有关。所以，它能够准确地测量位移因数。

但对于高次谐波电流，则由于它在一个周期内所产生的电磁力将互相抵消，对指针的偏转角不起作用。所以，如果用功率因数表来测量变频器输入侧的功率因数，所得到的结果是错误的。

问题 63　用绝缘电阻表（兆欧表）**直接检查变频器的绝缘电阻有哪些危害？**

1. 变频器的线路特点　变频器逆变电路中的 IGBT 管是需要由驱动电路（如图 2-46 中之 D1 ~ D6）来驱动的，驱动电路又是接受控制板来进行控制的。因此，控制板与主电路之间，是直接连接的。例如，驱动电路 D2、D4、D6 的 G 端都和主电路的 N 相接；而 D1、D3、D5 的 G 端则分别和主电路的 U、V、W 相接等。

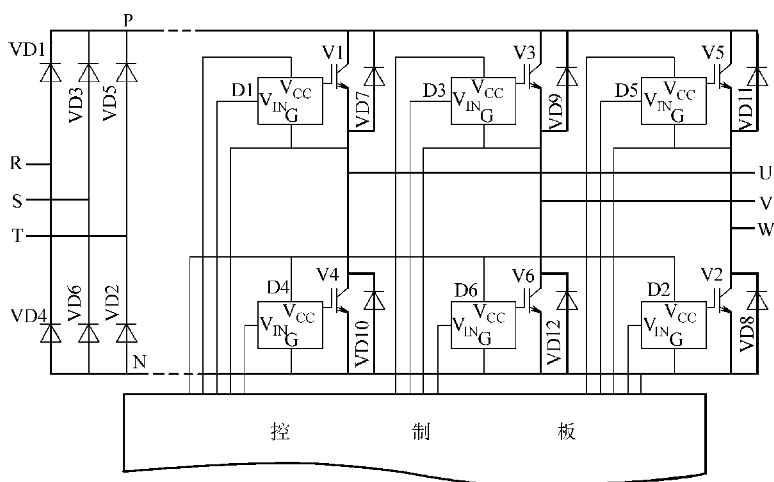


图 2-46　变频器的线路特点

所以，用兆欧表来测量变频器的绝缘电阻时，兆欧表的直流高压很容易进入控制板，把控制电路击穿。

2. 测量绝缘电阻的方法

（1）外接线绝缘电阻的测量　为了防止兆欧表的高电压施加到变频器上，必须把需要测量的外接线拆离变频器后再进行测量。

（2）变频器主电路绝缘电阻的测量　测量时，必须把变频器所有的进线端（R、S、T）和出线端（U、V、W）都连接起来，然后再进行测量，如图 2-47 所示。

3. 控制电路绝缘电阻的测量　应该用万用表的高阻挡进行测量，而不要用兆欧表或其他有高电压的仪表进行测量。

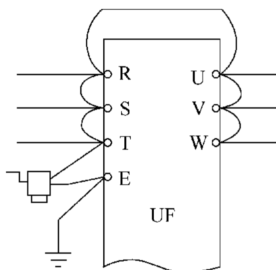


图 2-47　绝缘电阻的测量

第 3 章　频率调节与加减速

3.1　变频器的键盘与功能预置

问题 1　键盘输入器上主要配置哪些键？

不同变频器的键盘配置的差异较大，图 3-1 所示是不同类型的三个例子。

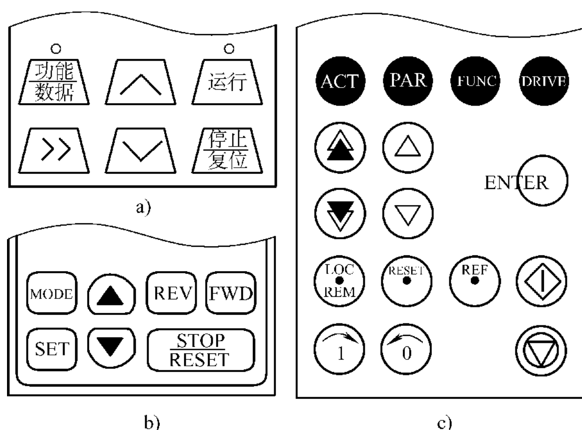


图 3-1　变频器的键盘配置

a）森兰 SB61　b）三菱 A540　c）ABB-ACS800

归纳起来，变频器的键盘主要有以下几类按键：

1. 模式转换键　用于更改工作模式，如运行模式（操作模式）、编程模式（功能预置模式）等。如图 3-1a 中的“功能/数据”键，图 b 中的“MODE”键，图 c 中的“PAR”（编程模式）和“ACT”（操作模式）键等；

2. 数据增、减键　用于增加或减小数据。包括：

（1）在编程模式下寻找功能码，以及修改数据码等；

（2）在运行模式下增加或减小变频器的输出频率等。

如图 3-1a 中的“∧和∨”键，图 b 中的“▲和▼”键，图 c 中

的“△和▽”和“▲和▼”（快速增、减）键等；

3. 读出、写入键　在功能预置模式下，用于“读出”或“写入”数据码。如图 3-1a 中的“功能/数据”键，图 b 中的“SET”键，图 c 中的“ENTER”键等；

4. 运行操作键　在运行模式下，用于进行“运行”、“停止”、“正转”、“反转”等操作。如图 3-1a 中的“运行”键和“停止/复位”键，图 b 中的“FWD”、“REV”和“STOP/RESET”键，图 c 中的 < I > （起动）和（▽）（停止）、↻（正转）和↺（反转）键等；

5. 复位键　用于在故障跳闸后，使变频器恢复为正常状态。如图 3-1a 中的“停止/复位”键，图 b 中的“STOP/RESET”键，图 c 中的“RESET”键等。

问题 2　变频器的功能包括哪些方面？

变频器的功能十分丰富，主要的常用功能有以下几个方面：

1. 操作方式的选择功能　包括：

（1）给定方式的选择　如键盘给定、外接给定等；

（2）操作方式的选择　如键盘操作、外接端子控制等。

2. 频率控制功能　包括：

（1）频率范围的设定功能　如最高频率、上限频率和下限频率等；

（2）频率给定功能　如频率给定信号的选择、模拟量给定的范围选择与调整等；

（3）其他功能　如回避频率、载波频率等。

3. 加速与减速功能　包括：

（1）加、减速时间的设定功能　如一挡加、减速时间的设定、多挡加、减速时间的设定等；

（2）加、减速方式的设定功能　如线性加、减速、S 形加、减速，半 S 形加、减速等；

（3）起动功能　如起动频率、起动过程中的暂停加速、起动前的直流制动等；

（4）停机功能　如停机方式选择、直流制动等。

4. 特性调整功能　包括：

（1）控制方式的选择功能　如 V/F 控制方式、无反馈矢量控制

方式、有反馈矢量控制方式等；

（2）V/F 模式下的补偿功能　如 U/f 线的选择、转差补偿等；

（3）矢量控制的相关功能　如电动机参数的自测定等。

5. 外接控制端子的设定功能　包括：

（1）输入控制端子的设定功能；

（2）输出控制端子的设定功能。

6. 系统控制功能　包括：

（1）程序控制功能；

（2）PID 控制功能。

7. 保护功能　包括：

（1）变频器对各种故障的保护功能　如过载保护、过电流保护、过电压保护、欠电压保护等；

（2）防止跳闸功能　如过电流和过电压的自处理功能、瞬时停电的重合闸功能、跳闸后的重合闸功能等。

问题 3　什么是功能码和数据码？

用户在进行功能预置时，首先要找到所需预置的功能，然后用简单明了的方式来预置所要求的数据。为此，变频器必须对各种功能以及在该功能中提供选择的数据进行编码。

1. 功能码　变频器的功能多达一、二百种，为了使用户能够便捷地找到所需要的功能，各种变频器都对所有功能按照一定规律进行了编码。所以，变频器的每种功能都有一个代码，称为功能码。

例如，在森兰 SB61 系列变频器中，功能码“F001”表示频率给定方式选择；“F413”表示加、减速方式等。在安圣 TD3000 变频器中，功能码“F0. 08”表示上限频率；功能码“F0. 10”表示升速时间等。

2. 数据码　表示各种功能所需预置的数据或代码。它有以下几种情形：

（1）直接数据　有些功能中所需预置的内容本身就是数据，如最高频率为 50Hz；升速时间为 20s 等。

（2）间接数据　有些功能中所需预置的内容难以提供准确的数据，而只能将该项内容分成若干档，如对于“转矩补偿”（转矩提升）功能，选择第“5”档 U/f 线等。

（3）赋值代码　有些功能中所需预置的内容本身并不是数据，例如频率给定方式、升速、降速方式等，在这种情况下，通常对于不同的预置内容分别用不同的代码来表示，称之为赋值代码。例如，在安圣 TD3000 系列变频器中，对于操作模式的选择功能，分别赋值为：0 表示键盘操作方式；1 表示外部操作方式；2 表示通信控制方式，等。

问题 4　变频器的功能码有哪几种编码规律？

不同的变频器对功能码的编制方式也不一样，但大致有以下几种类型：

（1）连续编码型　即所有的功能码基本上都是连续编码的。属于这种类型的变频器如：森兰 SB61 系列、三菱 FR-640 系列（日）、富士 G11S 系列（日）等。

（2）分区编码型　即，将所有的功能分成若干个功能区，从一个功能区到另一个功能区，须通过按“模式转换”键进行转换。例如：

康沃 CVF 变频器将主要功能分为基本功能区（b 功能区）、中级功能区（L 功能区）和高级功能区（H 功能区）。在预置完基本功能后，须按“MODE”键，才能进入中级功能区，再按“MODE”键，便进入高级功能区；

安圣 TD3000 系列变频器则将主要功能分为 16 个功能区，分别为：F0（基本功能）、F1（电动机参数）、F2（辅助参数）、F3（矢量控制）、F4（V/F）控制、F5（开关量端子）、F6（模拟量端子）、F7（过程 PID）、F8（简易 PLC）、F9（通信及总线）、FA（增强功能）、Fb（编码器功能）、FC（保留功能）、Fd（显示及检查）、FE（厂家保留）、FF（通信参数）。F0、F1 ~ FF 之间的转换，只需按▲键或▼键即可。

明电 VT230 系列变频器（日）的功能码又多了一个层次：除了把主要功能分为 A 组、B 组、C 组和 U 组外，每个功能中还有若干个子功能。

（3）按搜索方式分类编码型　有的变频器把编码表中部分常用的功能单独列出，称为“快速编程功能”。例如：

安川 CIMR-G7A 系列（日）变频器把 350 余种功能中，常用的

28 种功能作为快速编程功能。当切换至“快速编程模式”时，只能对该 28 种功能进行预置。如不需要快速编程时，则切换为“高级编程模式”，可以对 350 余种功能（包括上述 28 种功能）进行预置。

（4）按典型应用分类　有的变频器在说明书中，按照不同的典型应用（也叫“应用宏”）所需要预置的功能分别列出，以利用户掌握。例如：

瓦萨 CX 系列变频器为用户提供了 6 种典型应用，分别是：标准应用、本机/遥控应用、多挡速度应用、PI 控制应用、多用途控制应用和泵类、风机控制应用。用户首先选择其中的一种，然后根据该典型应用的功能表进行功能预置。

问题 5　变频器出厂时已经把各种功能预置好了，为什么还要进行功能预置？

生产机械的类型十分繁多，它们的负荷特性千差万别，对变频调速系统的要求也各不相同。变频器的生产厂家所进行的功能预置，不可能符合所有生产机械的要求。所以，用户应针对生产机械的具体要求，进行核对和重新预置。

例如，某工业洗涤用的甩干机，要求在甩干最后阶段的最高频率为 90Hz。而变频器对最高频率的出厂设定大多是 50Hz 或 60Hz。所以，用户有必要对最高频率进行重新预置。

问题 6　进行功能预置一般需要哪些步骤？

一般功能预置都是通过编程方式来进行的。因此，功能预置都必须在“编程模式”下进行。尽管各种变频器的功能预置各不相同，但基本方法和步骤是十分类似的。今以三菱 FR-A540 系列变频器把加速时间（功能码为 P. 7）从出厂设定的 5s 增加为 20s 为例，其功能预置的过程如图 3-2 所示：

变频器开机后，都处于《运行模式》下，显示屏显示给定频率，如 50Hz。

第 1 步：按 MODE 键，切换为《编程模式》，显示屏显示“Pr. . ”；

第 2 步：按 ▲ 键或 ▼ 键，找出需要预置的功能码 P. 7；

第 3 步：按 SET 键，“读出”该功能码中原有的数据，显示屏显

示“5.0”，说明原有数据是 5s；

第 4 步：按▲键或▼键，将数据码修改为“20.0”；

第 5 步：按SET键 1.5s，“写入”新数据；

这时，新数据“20.0”与“Pr..”交替显示，询问预置工作是否结束？如果预置尚未结束，则转为第 2 步，再选下一个需要预置的功能码；如果需要预置的功能都已预置完毕，则：

第 6 步：按MODE键，切换为《运行模式》。

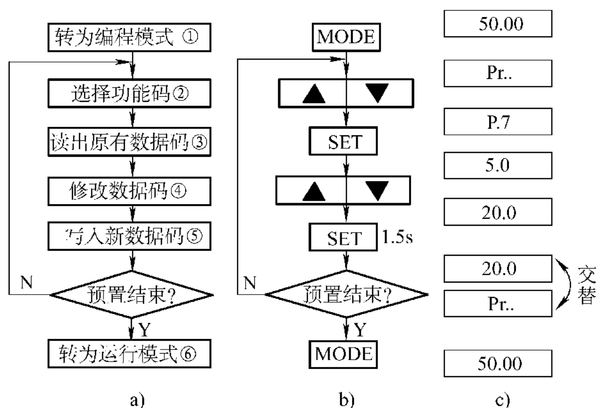


图 3-2 功能的预置流程

a）基本步骤 b）键盘操作 c）显示屏显示

问题 7 怎样找到需要预置的功能码？

寻找功能码是进行功能预置的关键步骤。由于各种变频器对功能码的安排很不相同，故寻找功能码的步骤也不尽相同。但归纳起来，大致可以分为三类：

（1）连续编码型 寻找功能码的步骤与上述三菱 FR-A540 系列变频器大同小异。

（2）分区编码型 以康沃 CVF 变频器为例，寻找方法如图 3-3 所示：

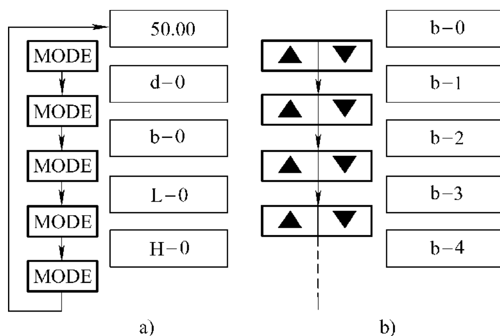


图 3-3　康沃 CVF 变频器寻找功能码
a）找出功能区　b）找出功能码

1）找出功能区　如图 a 所示，连续按 MODE 键，切换顺序如下：

运行模式（显示屏显示输出频率）

→ MODE →显示内容切换模式

→ MODE →基本功能区

→ MODE →中级功能区

→ MODE →高级功能区

→ MODE →返回运行模式。

2）找出功能码　通过 ▲ 键和 ▼ 键寻找，如图 b 所示。

（3）分层编码型　典型例子是明电 VT230S 系列变频器，寻找方法如图 3-4 所示：

1）找出功能区　如图 a 所示，连续按 RST/MOD 键，切换顺序如下：

运行模式

→ RST/MOD →A 功能区

→ RST/MOD →b 功能区

→ RST/MOD →C 功能区

→ RST/MOD →U 功能区

→ RST/MOD →返回运行模式。

2）找出主功能　连续按 LCL/◀ 键，切换顺序如图 b 所示：

A01—0 → LCL/◀ → A02—0 → LCL/◀ → A03—0 → LCL/◀ → A04—0…

3）找出子功能　旋转 ◯ 键，切换顺序如图 c 所示：

A00—0→ ◯ →A00—1 → ◯ →A00—2 → ◯ →A00—3 → ◯ → A00—4…

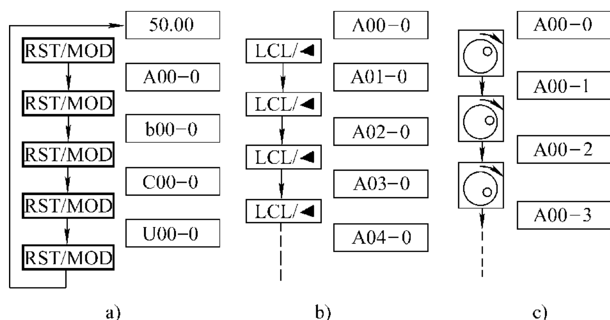


图 3-4　明电 VT230S 变频器寻找功能码

a）找出功能区　b）找出主功能　c）找出子功能

问题 8　变频器主要应预置哪些功能?

一般说来，必须注意的功能有以下几个方面：

（1）基本设定　如最高频率、基本频率、操作方式、给定方式等；

（2）控制方式的设定　选择控制方式，并对该控制方式中的相关功能进行预置；

（3）加、减速时间的设定　根据生产机械的要求，调整加、减速时间；

（4）保护功能的设定

（5）其他功能的设定　根据需要，对输入、输出控制端子的功能进行预置，以及是否需要预置系统控制功能等。

3.2　频率给定功能

问题 9　变频器有几种频率给定方式？

常用的给定方式如下：

1. 面板给定　如图 3-5a 所示。

（1）键盘给定　即通过键盘上的升键（△、▲或∧）和降键（▽、▼或∨）来调节频率，是数字量调节。

（2）电位器给定　即通过面板上的电位器来调节频率。

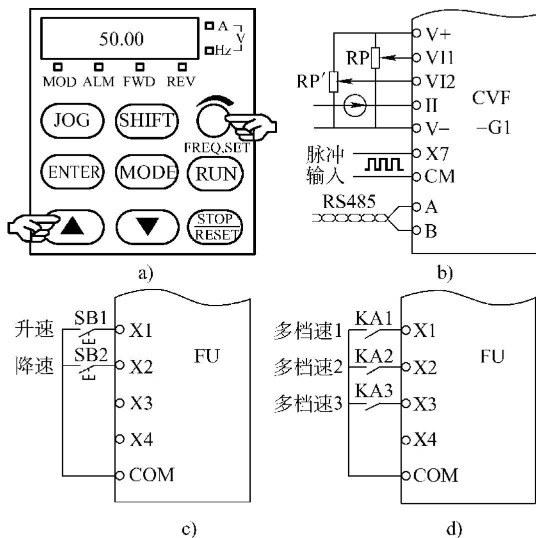


图 3-5　频率给定方式

a）面板给定　b）外接给定　c）端子升、降速给定

d）端子多挡速给定

2. 外接给定　即通过从外部输入给定信号来调节频率，如图 b 所示。

（1）电压信号给定　在大多数情况下，是利用变频器内部提供的给定电源，通过外部接入电位器来得到所需的电压信号。多数变频器常常有两个或两个以上的电压信号输入端，如图 b 中之 VI1 和 VI2 端。

给定电压的范围有：0 ~ +10V、0 ~ ±10V、0 ~ +5V、0 ~ ±5V等。

（2）电流信号给定　如图b中之II端。给定范围有：0 ~ 20mA和4 ~ 20mA。

（3）脉冲给定　频率给定信号为脉冲信号，如图b中之X7所示。

3. 接口给定　即通过变频器提供的RS485接口由微机或PLC给定。

4. 多功能输入端子给定　在变频器功能输入端子中，经过功能预置，使其中的两个或多个端子用于频率给定。常用的有：

（1）升速、降速给定　在多功能输入端子中任选两个，经过功能预置，使之成为“升速”端子和“降速”端子，如图c所示。

（2）多挡速给定　在多功能输入端子中任选若干个，经过功能预置，使之成为多挡速控制端子，如图d所示，则通过该几个端子的不同组合，可以得到不同的转速。

问题10　变频器怎样决定采用何种给定方式？

选择给定方式时，应考虑的主要问题有：

1. 控制精度　对频率给定要求精度不高者，可以采用模拟量输入；如对频率给定要求精度较高者，则应选择数字量给定方式。

2. 控制距离　即操作人员与变频器之间的距离。距离较远者，应采用外接给定方式。故有的变频器常把外接给定方式称为远程给定方式。

3. 抗干扰要求　如变频器周围有较强的干扰源的话，必须考虑抗干扰问题。一般说来：

（1）通过外接输入端子进行开关量控制的抗干扰能力最强；

（2）在模拟量给定方式中，电流给定的抗干扰能力较强。

问题11　通过外接信号来改变电动机的旋转方向时须注意哪些问题？

1. 控制方式　通过外接信号控制电动机的旋转方向时，这时：

给定信号可“－”可“+”，正信号控制正转，负信号控制反转，如图3-6a所示。

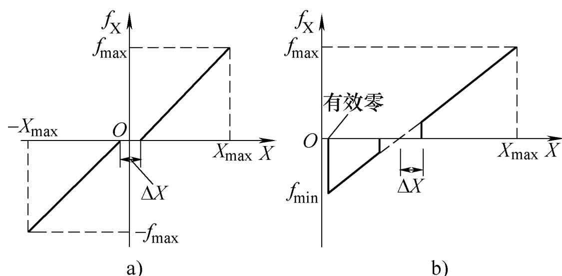


图 3-6　模拟量给定的正、反转控制
a）以原点为零输出　b）以中间值为零输出

2. 需要注意的问题

（1）设置死区　用模拟量给定信号进行正、反转控制时，“0”速控制很难稳定，在给定信号为“0”时，常常出现正转或反转的“蠕动”现象。为了防止这种“蠕动”现象，需要在“0”速附近设定一个死区 ΔX，使给定信号在此区间内，输出频率为 0Hz。

（2）设置有效“0”　在给定信号为单极性的正、反转控制方式中，存在着一个特殊的问题。即，万一给定信号因电路接触不良或其他原因而“丢失”，则变频器的给定输入端得到的信号为“0”，其输出频率将跳变为反转的最大频率，电动机将可能从正常工作状态转入高速反转状态。十分明显，在生产过程中，这种情况的出现将是十分有害的，甚至有可能损坏生产机械。

对此，变频器设置了一个有效“0”功能。就是说，让变频器的实际最小给定信号不等于 0（$X_{min}>0$），而当给定信号 $X=0$ 时，变频器将认为是故障状态，如图 c 所示。

例如，将有效“0”预置为 0. 3V 或更高。则：

当给定信号 $X=0.3V$ 时，变频器的输出频率为 f_{min}；

当给定信号 $X<0.3V$ 时，变频器的输出频率降为 0Hz。

问题 12　频率给定用电位器与说明书要求的不一样行不行？

外接电位器给定的电路如图 3-7 所示：“V +”是变频器内部给定电路的直流电源正端，“V -”是零电位端，给定电压 $U_G=10V$；VI1 是输入信号端。

分析如下：

1. RP的阻值　由于在中心抽头VI1处，变频器通常用绝缘栅场效应管来接受信号，故取用的电流十分微小，可以忽略不计。所以，RP的阻值大小对于接受给定信号并无影响。通常，取：

$$RP=(1\sim10)\,k\Omega$$

2. RP的容量　以 $RP=1k\Omega$ 为例，电位器消耗的功率为

$$P_{RP}=\frac{U_G^2}{RP}=\frac{10^2}{1000}=0.1W$$

可见，电位器消耗的功率是很小的。但因为电位器的中心抽头处的磨损较大，故通常选：

$$P_{RP}=(1\sim5)\,W$$

所以，只要给定电位器的阻值和容量在上述范围内，都是可用的。

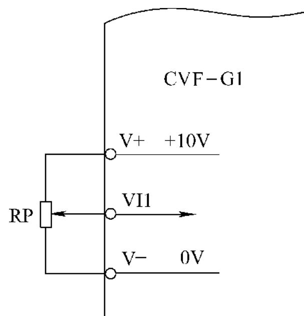


图3-7　外接电位器给定

问题13　某控制器的输出信号为2～8V，要求变频器的对应频率是0～50Hz，如何处理？

1. 变频器的频率给定线　由模拟量进行外接频率给定时，变频器未经补偿的输出频率（也叫给定频率）f_X 与对应的给定信号 X 之间的关系曲线 $f_X=f(X)$，称为频率给定线。这里的给定信号 X，既可以是电压信号 U_G，也可以是电流信号 I_G。

当给定信号 X 从0增大至最大值 X_{max} 的过程中，给定频率 f_X 线性地从0增大到最大频率 f_{max} 的频率给定线称为基本频率给定线。其起点为（$X=0$，$f_X=0$）；终点为（$X=X_{max}$，$f_X=f_{max}$），如图3-8a所示。

2. 频率给定线的预置　有的时候，用户所要求的对应关系与基本频率给定线并不一致，这就有必要对频率给定线进行调整了。因为频率给定线是直线，所以只需确定起点和终点就可以了。

根据问题中的要求，当给定信号 $U_G=2V$ 时，频率 $f_X=0Hz$，如图3-8b中之A点；当给定信号 $U_G=8V$ 时，频率 $f_X=50Hz$，如图3-8b中之B点。直线AB便是所需之频率给定线。各种变频器中，预置频率给定线的方法大致有以下两种：

方法1：坐标设定法。即，只需预置图3-8b中A点和B点的坐标即可：

（1）起点（A）坐标　$X_{min}=2V$，$f_{min}=0Hz$；

（2）终点（B）坐标　$X_{max}=8V$，$f_{max}=50Hz$。

方法 2：偏置与增益设定法。部分变频器通过预置偏置频率和频率增益来决定频率给定线的，说明如下：

（1）偏置频率　给定信号 $X=0$ 时对应的频率称为偏置频率，用 f_{BI}表示。在图 3-8b 中，延长 AB 直线，与纵轴交于 C 点，则 C 点对应的频率便是偏置频率，算出如下：

$$f_{BI} = -16.6Hz$$

（2）频率增益　把变频器的最大给定信号对应的频率定义为最大给定频率，如图 3-8b 中 D 点对应的频率，用 f_{XM}表示。则最大给定频率与最高频率之比定义为频率增益 $G\%$：

$$G\% = \frac{f_{XM}}{f_{max}} \times 100\% \qquad (3\text{-}1)$$

本例中，$G\%=133\%$。

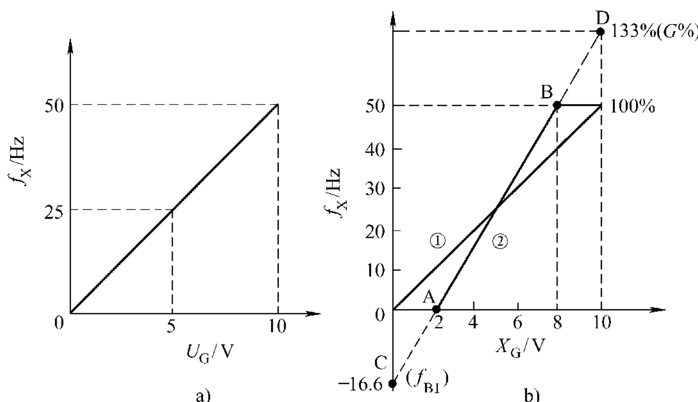


图 3-8　频率给定线

a）基本频率给定线　b）任意频率给定线

问题 14　某变频器采用电位器给定方式，用户要求：当外接电位器从“0”位旋到底（给定信号为 10V）**时，输出频率范围为 0 ~30Hz，如何处理？**

1. 偏置增益设定法（见图 3-9a）　基本频率给定线是曲线①，用

户要求的频率给定线是曲线②（0A 线）。因为曲线②的起点在原点，故不需预置偏置频率，只需算出频率增益就可以了，计算结果如下：

$$G\% = 60\%$$

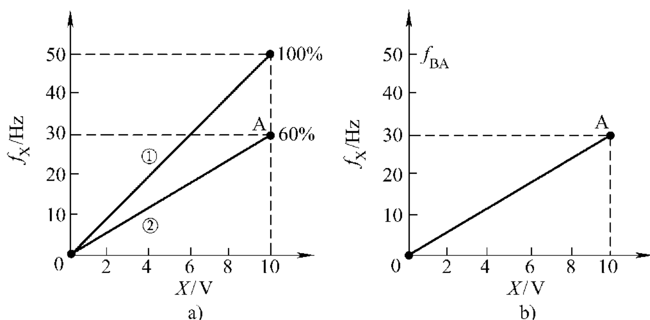


图 3-9　问题 14 的频率给定线

a）偏置增益法　b）坐标设定法

2. 坐标设定法（见图 3-9b）

（1）起点（0）坐标　$X_{min} = 0V$，$f_{min} = 0Hz$；

（2）终点（A）坐标　$X_{max} = 10V$，$f_{max} = 30Hz$。

问题 15　模拟量给定信号中，电压范围是 1 ~ 5V，电流范围是 4 ~ 20mA，为什么不从“0”开始？

在远距离控制中，给定信号的范围常常用 1 ~ 5V 或 4 ~ 20mA，其“零”信号分别为 1V 和 4mA。这是为了便于检查工作是否正常，具体说明如下：

（1）零信号　即给定信号为“0”。在进行测量时，因为电路内还有 1V 或 4mA，说明给定信号电路的工作是正常的，如图 3-10a 所示；

（2）无信号　给定信号因传感器或信号电路发生故障而根本没有信号，在进行测量时，如果给定信号值为 0V 或 0mA，说明给定电路的工作不正常，如图 3-10b 所示。

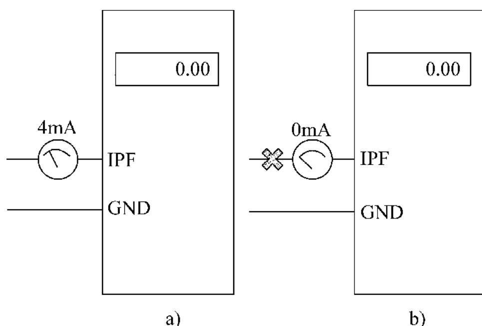


图 3-10　零信号和无信号

a）零信号　b）无信号

问题 16　某仪器的输出电压信号是 1～5V，但所购变频器的电压给定信号只能选 0～10V，怎么办？

1. 偏置增益设定法　变频器的给定信号范围是 0～10V，对应的输出频率是 0～50Hz，故基本频率给定线如图 3-11a 中之曲线①所示。根据用户要求作出的频率给定线如曲线②之 AB 段（见图 a），可以算出：

偏置频率：$f_{BI}=-12.5\text{Hz}$（或 -25%）；

频率增益：$G\%=225\%$。

2. 坐标设定法　如图 3-11b 所示，功能预置如下：

A 点：$X_{min}=1\text{V}$；$f_{min}=0\text{Hz}$。坐标为（1，0）；

B 点：$X_{max}=5\text{V}$；$f_{max}=50\text{Hz}$。坐标为（5，50）。

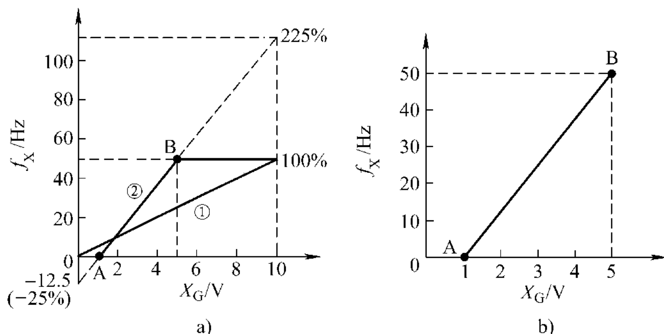


图 3-11　问题 16 的频率给定线

a）偏置增益法　b）坐标设定法

问题 17　微机的输出电压是 0～5V，但变频器的实际频率范围为 0～48Hz，是什么原因？如何修正？

这类问题之所以发生，主要是计量上的原因。因为任何计量都是有误差的。本例中，微机输出 5V，变频器只有 4.8V。所以，修正方法如下：

1. 偏置增益设定法　如图 3-12a，基本频率给定线是曲线①，实际要求的频率给定线是曲线②（0A 线）。因为起点在原点，不必预置偏置频率，其频率增益计算结果如下：

$$G\% = 104.2\%$$

2. 坐标设定法　如图 3-12b，曲线 0A 的起点坐标是（0，0）；终点坐标是（4.8，50）。

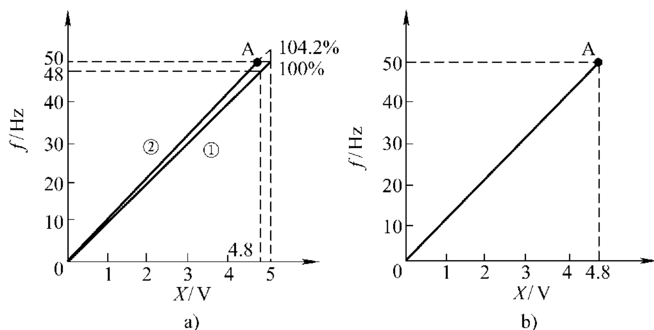


图 3-12　问题 17 的频率给定线
a）偏置增益法　b）坐标设定法

问题 18　有一台变频器，当输入信号为 0V 时，输出频率却不为 0Hz，是什么原因？

可以从两个方面进行检查：

1. 检查变频器的功能预置情况　需要检查的功能如：

（1）下限频率是否为 0Hz？

（2）偏置频率（或与最小给定信号对应的频率）是否为 0Hz？

2. 检查输入信号　在外接模拟量给定时，或因电位器的滑动端接触不良而存在接触电阻的电压降；或因提供信号的设备输出的“0”信号，实际上并非 0V。

检查的方法如图 3-13 所示，用万用表的毫安挡去碰一下变频器的电压给定端，观察指针是否有反映？如指针有反映，说明实际的给定信号不为 0V。必须注意的是：不要让万用表的表笔停留在电压给定端上，以免损坏万用表。

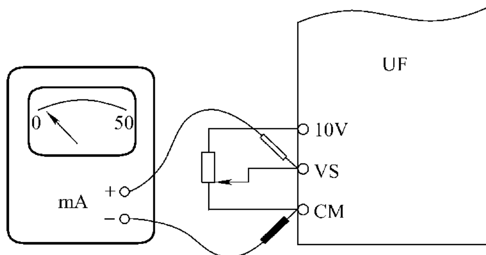


图 3-13　检查给定信号是否为 0

问题 19　变频器电压给定信号的范围是 0～5V，但实际给定信号是 1～5V，要求的频率范围是 50～0Hz，怎么解决？

根据用户所要求，作出频率给定线如图 3-14 中所示之直线 AB。

预置方法如下：

1. 偏置增益设定法

（1）偏置频率　延长 AB，使之与纵坐标相交，得：

$$f_{BI}=60\text{Hz}$$

（2）频率增益　因为“最大给定频率” $f_{XM}=0\text{Hz}$，代入式（3-1），得：

$$G\%=0\%$$

2. 坐标设定法

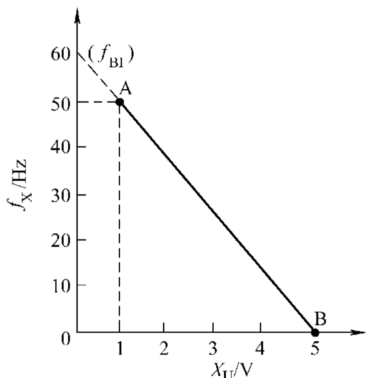


图 3-14　问题 19 之频率给定线

（1）起点（A 点）坐标　$X_{min}=1\text{V}$，$f_X=50\text{Hz}$。坐标为（1，50）；

（2）终点（B 点）坐标　$X_{max}=5\text{V}$，$f_X=0\text{Hz}$。坐标为（5，0）。

问题 20　某变频器无说明书，也看不清型号，控制端子中不知道哪个是电压信号输入端（有 CM 端），**怎么办？**

1. 找出给定电源　即找出变频器内部为给定电路提供的电源

“＋”端和公共端。

电源“＋”端的符号有：V＋、＋10V、＋5V 等；

公共端（“0V”端）的符号有：V－、CM、ACM、COM、GND 等。

图 3-15a、b、c、d 是几种常见变频器的设置情况。

只要在上述端子中找到电源的一个端子，就可以用万用表找出另一个端子，如图 3-15e 和 f 所示。

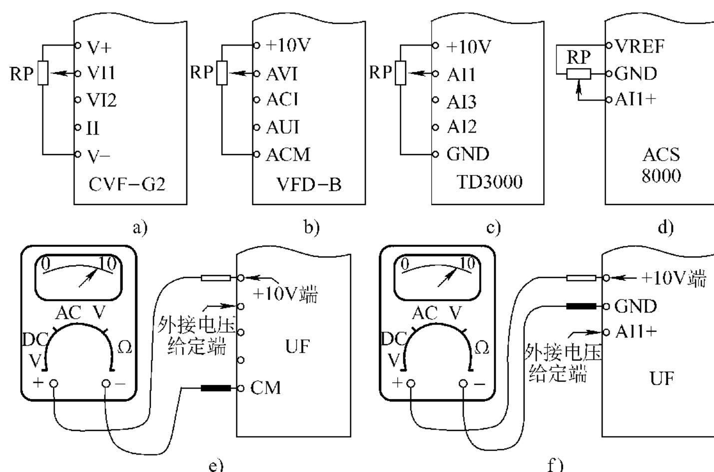


图 3-15　变频器的外接电压给定电路

a）康沃变频器　b）台达变频器　c）艾默生变频器

d）ABB 变频器　e）外接给定判断 1　f）外接给定判断 2

2. 找出给定信号输入端　多数变频器的电压给定信号输入端都安置在紧挨着电源“＋”端的位置，如图 a、b、c 所示；也有少数变频器的电压给定信号输入端安置在“－”端的下面，如图 d 所示。

作出初步判断后，可以接入一个电位器进行试验。

问题 21　辅助给定信号与主给定信号之间是什么关系？

当变频器有两个或多个模拟量给定信号同时从不同的端子输入时，其中必有一个为主给定信号，其他为辅助给定信号。

大多数变频器的辅助给定信号都是叠加到主给定信号（相加或

相减）上去的。叠加后的频率给定线如图 3-16 中的曲线②和曲线③所示。

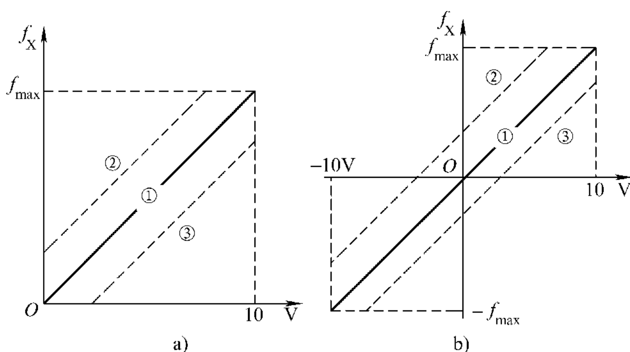


图 3-16　信号叠加举例

a）不可逆调速　b）可逆调速

3.3　频率的相关功能

问题 22　最高频率和基本频率有什么区别?

1. 基本频率　有两种定义方法：

（1）和变频器的最大输出电压对应的频率，称为基本频率；

（2）当变频器的输出电压等于额定电压时的最小输出频率，称为基本频率。

基本频率用 f_{BA} 表示。在绝大多数情况下，基本频率都和电动机的额定频率相等，如图 3-17a 所示。

2. 最高频率　是变频器允许输出的最大频率，用 f_{max} 表示。其具体含义因频率给定方式的不同而略有差别：

（1）由键盘进行频率给定时，最高频率意味着能够调到的最大的频率。就是说，到了最高频率后，即使再按▲键，频率也不能再上升了；

（2）通过外接模拟量进行频率给定时，最高频率通常指与最大的给定信号相对应的频率，如图 3-17b 所示。

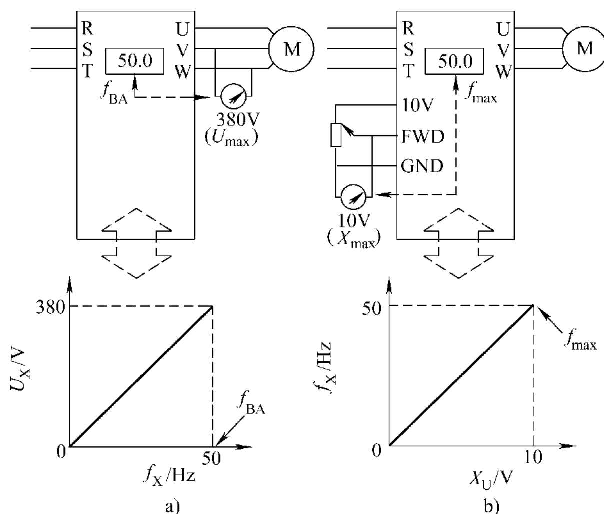


图 3-17　基本频率与最大频率

a）基本频率　b）最大频率

在大多数情况下，最高频率与基本频率是相等的。例如，风机和水泵，当运行频率超过基本频率时，负载的阻转矩将增加很大，使电动机过载。所以，必须把最高频率限制在基本频率以内。

问题 23　上限频率和最高频率有什么区别？

1. 上限频率和下限频率的确定　上限频率和下限频率是根据生产工艺的要求设定的。以某搅拌机为例，生产工艺要求：

最高搅拌速度 $n_{LH} \leqslant 600$r/min；

最低搅拌速度 $n_{LL} \geqslant 150$r/min。

如图 3-18a 所示。

传动机构的传动比 $\lambda = 2$，所以，电动机的最高转速和最低转速分别是：

$n_{MH} \leqslant 1200$r/min，对应的工作频率便是上限频率 f_H；

$n_{ML} \geqslant 300$r/min，对应的工作频率便是下限频率 f_L。

如图 3-18b 所示。

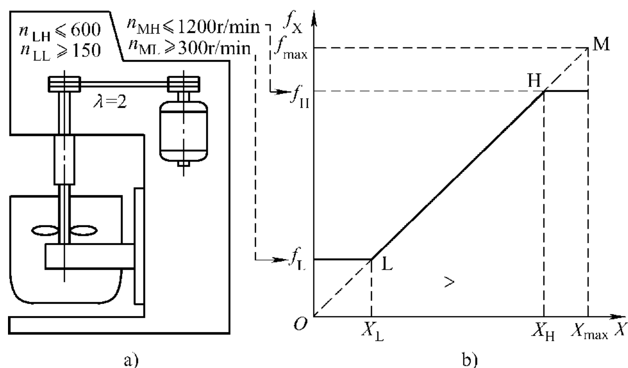


图 3-18　上限频率与最高频率

a）搅拌机的工艺要求　b）上、下限频率

2. 上限频率和最高频率的关系

（1）上限频率不能超过最高频率：

$$f_H \leqslant f_{max}$$

如果用户希望增大上限频率，则首先应将最高频率预置得更高一些。

（2）当上限频率与最高频率不相等（$f_H \neq f_{max}$）时，上限频率优于最高频率，变频器的最大输出频率为上限频率。这是因为，变频调速系统是为生产工艺服务的。所以，生产工艺的要求具有最高优先权。

（3）部分变频器中，上限频率与最高频率并未分开，两者是合二为一的。

问题 24　有一台鼓风机，每当运行在 20Hz 时，振动特别严重，怎么解决？

当电动机在某一频率（如本例中之 20Hz）下运行时，其振动频率和机械的固有振荡频率相等或接近时，将发生机械的谐振。遇到这种情况，说明电动机不宜在该频率下运行。该频率属于应该回避的频率，称为回避频率或跳跃频率。意思是把该频率跳过去（回避掉），如图 3-19a 所示。

一台变频器通常可预置三处回避频率，如图 3-19b 所示。

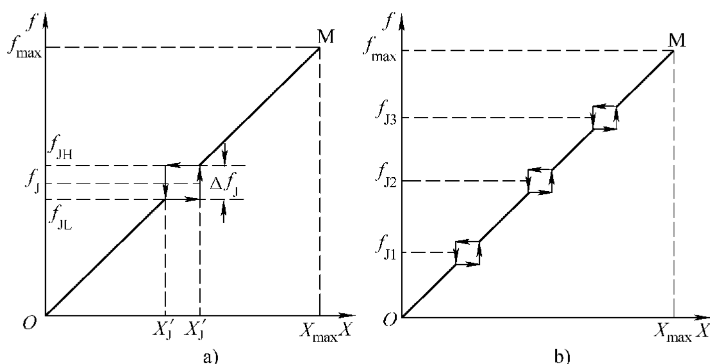


图 3-19　回避频率

a）回避频率的预置　b）三处回避频率

预置回避频率的方法大致有两种：

（1）预置回避的中心频率f_J，在本例中，$f_J=20\text{Hz}$。有的变频器在预置回避中心频率的同时，还需预置回避宽度 Δf_J，在本例中，回避宽度可预置为 $\Delta f_J=2\text{Hz}$。

（2）预置每个回避频率的上限频率f_{JH}和下限频率f_{JL}。在本例中，可预置为：

$$f_{JL}=19\text{Hz};$$
$$f_{JH}=21\text{Hz}。$$

问题 25　22kW 的搅拌用电动机，工频运行时的满载电流是 41A，用了变频器后，50Hz 时的满载电流是 43A（额定电流是 42.5A），**为什么？能否减小？**

如上述，变频器同一桥臂的两个逆变管在交替导通过程中，必须设置死区 Δt。现以变频器的载波频率等于 5kHz 为例，说明死区的影响如下：

当载波频率等于 5kHz 时，50Hz 正弦波的每个周期内，有 100 个电压调制波。而电压调制波的每个周期，逆变管将交替导通 2 次。所以，正弦波的每个周期内，有 200 个死区。假设死区宽度为 4μs，则一个周期中死区的总时间为 0.8ms，占整个周期的 4%。就是说，变频器输出的最大电压，将只有额定电压的 98%：

$$U_M = 380 \times 96\% = 364.8\text{V}$$

电动机的输入电压下降了，在输出功率不变的情况下，其电流将略有增加。

适当减小载波频率，可以使电流减小一些。例如，将载波频率减小为 2kHz，则 50Hz 正弦波的每个周期内，逆变管将只交替 80 次。在死区宽度为 4μs 的情况下，一个周期中死区的总时间为 0.32ms，占整个周期的 1.6%。就是说，变频器输出的最大电压，将提高为额定电压的 98.4%：

$$U_M = 380 \times 98.4\% \approx 374\text{V}$$

和额定电压已经十分地接近了，电动机的定子电流也能略减小些。

问题 26　为什么在容量、载波频率和输出频率都相同的情况下，不同变频器的输出电压（电动机满载运行）**和电流不完全一样？**

这和变频器所用逆变管的参数（主要是关断时间）有关。

目前，逆变用 IGBT 管的关断时间从 1～4μs 不等。因此，在设计变频器时，设置的死区时间也不一样。

仍以上述情况为例，如由于所用逆变管的关断时间较长，变频器把死区宽度增大为 6μs，则一个周期中死区的总时间为 1.2ms，占整个周期的 6%。就是说，变频器输出的最大电压，将只有额定电压的 94%：

$$U_M = 380 \times 94\% = 357.2\text{V}$$

所以，即使容量、载波频率和输出频率都相等，不同变频器的输出电压也可能不完全相同。

3.4　升速和起动功能

问题 27　异步电动机的工频起动有什么特点？

如图 3-20a 所示，当异步电动机合上工频电源后，立即产生旋转磁场，转速为额定同步转速，磁通也是额定磁通。所以，转子绕组以额定转速切割着额定磁通，如图 3-20b 所示，与正常运行时相比，其感应电动势和电流是非常大的。反映到定子侧，起动电流可达到额定电流的（4～7）倍，如图 3-20c 所示。因为时间很短，不会“烧毁”

电动机。但如果电动机的功率很大的话，起动时的冲击电流将会使网络电压瞬时下降，如图 3-20d 所示，这会干扰其他设备的正常运行。

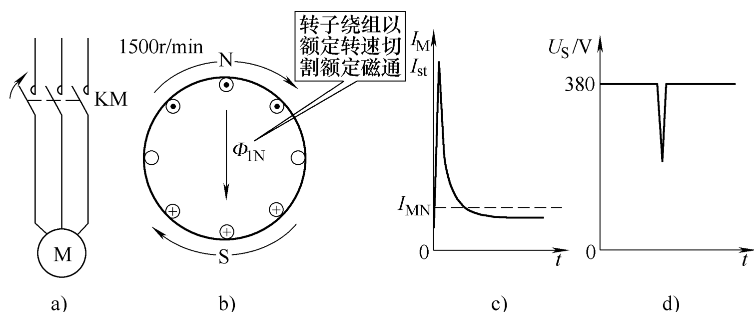


图 3-20　工频直接起动的特点

a）直接起动　b）主要特点　c）起动电流　d）电源电压

问题 28　工频起动的起动过程有什么特点？

电动机的电磁转矩和负载的阻转矩之差，称为动态转矩，用 T_J 表示。T_J 是电力拖动系统产生加速度的原因。

图 3-21a 所示是恒转矩负载在起动过程中的动态转矩，图 3-21b 所示是二次方律负载在起动过程中的动态转矩。由图可知，异步电动机在起动过程中，动态转矩是非常大的，所以起动过程十分短暂，通常不足 1min，水泵的起动时间甚至只有 0. 25s，如图 3-21c 所示。

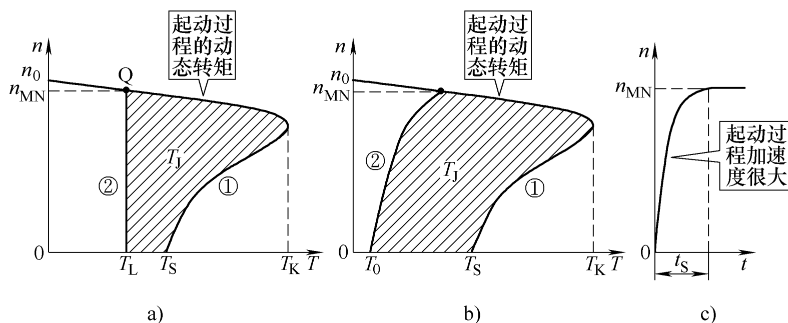


图 3-21　工频直接起动的起动过程

a）恒转矩负载起动　b）二次方律负载起动　c）加速过程

问题 29　工频直接起动对电力拖动系统有哪些弊端？

举例说明如下：

1. 带式输送机　输送带在停机时处于松弛状态，起动后绷直，如图 3-22a 所示。由于起动很快，输送带从松弛状态迅速绷直，起动次数多了，将影响其使用寿命。

2. 齿轮　如图 3-22b 所示，停机时，啮合点在 B 点，起动时啮合点将从 B 点转移到 A 点，由于起动很快，将使 A 点处受到撞击，久而久之，齿轮的寿命将受到影响。

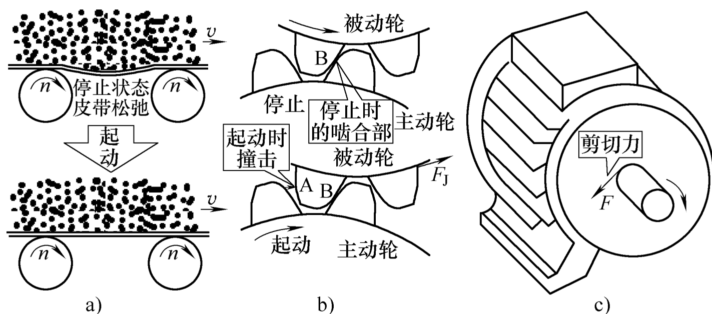


图 3-22　工频直接起动的危害

a）带式输煤机　b）齿轮　c）电动机的轴

3. 电力拖动系统的轴　由于起动很快，电力拖动系统的各轴，都将受到很大的剪切力，容易被剪断。

4. 水锤效应　水泵在工频起动时，供水系统的流量在不足 1s 的时间内迅速上升到额定流量，管道内的压力变化太快，将产生水锤效应，对管道和阀门等产生很大的破坏力。

问题 30　软起动器起动有什么特点？

软起动器实质上就是无级减压起动，如图 3-23a 所示。因为电压降低了，磁通也随之减小了。所以，软起动器起动的特点就是转子以额定转速切割较小磁通，如图 3-23b 所示。从而减小了感应电动势和电流，如图 3-23c 所示，其机械特性如图 3-23d 所示。由图可知，开始起动时，动态转矩不大，可以避免机械的冲击。但在起动过程中，动态转矩将会随着电压的上升而增加。

另一方面，起动转矩将因电压的降低而减小。所以，软起动器不

适用于重载起动的场合，选用时，一定要注意生产机械起动转矩的大小。

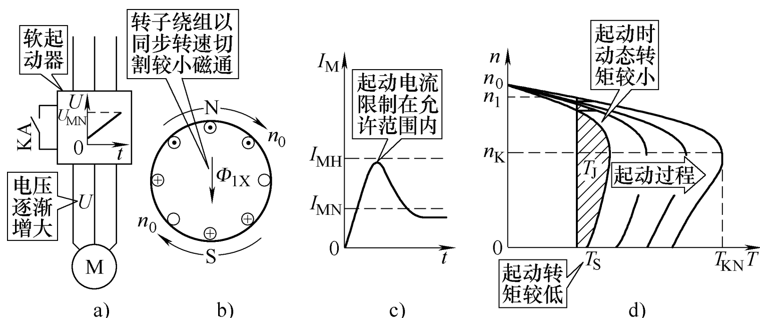


图 3-23　软起动器的起动特点

a）减压起动　b）特点　c）起动电流　d）机械特性

问题 31　转子串联电阻起动有什么特点？

绕线转子异步电动机常采用在转子回路内串联电阻器的方法起动，如图 3-24a 所示。虽然，转子绕组仍以额定转速切割额定磁通，感应电动势很大，但因为转子回路内串联了电阻器，故电流不大，如图 3-24b 所示。其机械特性如图 3-24c 所示。由图可知，在开始起动时，动态转矩较大，但后来就减小了。

这种方法的起动转矩较大。所以，转子串联电阻器的起动方法常用于需要重载起动的场合，如起重机械等。

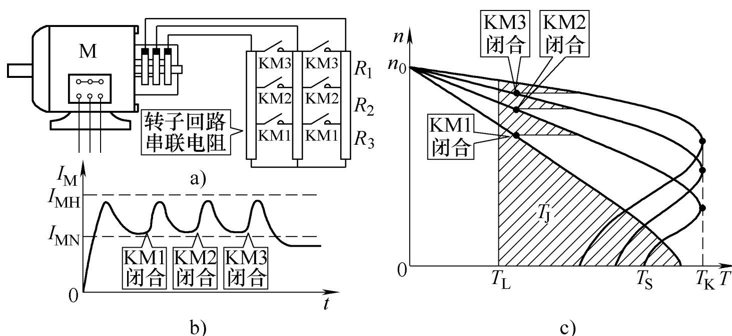


图 3-24　转子串联电阻的起动特点

a）起动特点　b）起动电流　c）机械特性

问题 32　变频起动有些什么特点?

电动机配用变频器后，如图 3-25a 所示，起动是在很低的频率下开始的。因为频率很低，所以，转速也很低。但磁通却保持为额定磁通。因此，变频起动的特点就是：转子绕组以很低的转速切割额定磁通，如图 3-25b 所示。这时，其感应电动势和电流可以控制在很小的范围内。

起动过程中的机械特性如图 3-25c 所示。在整个起动过程中，动态转矩也被控制在很小的范围内，从而其起动过程将是十分平稳的。

所以，变频起动是所有起动方式中最佳的一种。

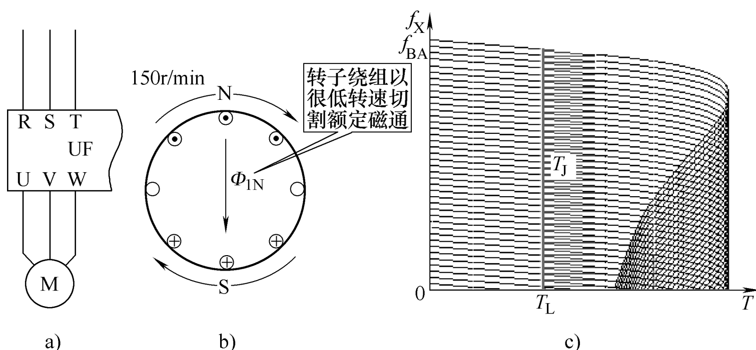


图 3-25　变频起动的特点

a）变频起动　b）起动特点　c）机械特性

问题 33　什么是加速时间?加速时间和起动电流是什么关系?

所谓加速时间，是指变频器的输出频率从 0Hz 上升到基本频率（或最高频率）所需要的时间。是用户根据生产机械的具体要求自行预置的。

加速时间预置得长，变频器的输出频率和电动机的转速上升得慢，电动机转子的转速跟得上同步转速的上升，转子转速和同步转速之间，保持着较小的转差，如图 3-26a_1 和 b_1 所示，转子的感应电动势和电流都较小，起动电流被限制在允许范围内，如图 3-26c_1 所示。

反之，如加速时间预置得短，变频器的输出频率和电动机的转速上升得快，电动机转子的转速将跟不上同步转速的上升，转子转速和同步转速之间的转差增大，如图 3-26a_2 和 b_2 所示，转子的感应电动势和电流也都增大，起动电流有可能超过变频器的承受能力，如图 3-26c_2 所示，甚至导致过电流跳闸。

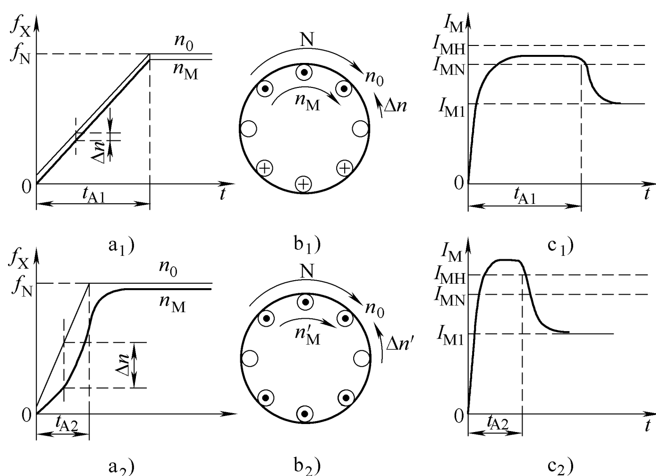


图 3-26　加速时间与起动电流

a）加速时间与转差　b）切割磁场速度　c）起动电流

问题 34　怎样计算变频器从 30Hz 上升到 45Hz 所需要的时间？

大部分变频器把加速时间 t_r 定义为从 0Hz 加速到基本频率 f_{BA} 所需要的时间，如图 3-27a 所示。

也有的变频器定义为从 0Hz 加速到最高频率 f_{max} 所需要的时间。

现以第一种定义方式为例，假设预置的加速时间为 30s，则如图 3-27b：从 30Hz 上升到 45Hz 所需要的时间可计算如下：

$$t_{12} = t_r \frac{f_2 - f_1}{f_{BA}} = 30 \times \frac{45 - 30}{50} \text{s} = 9\text{s}$$

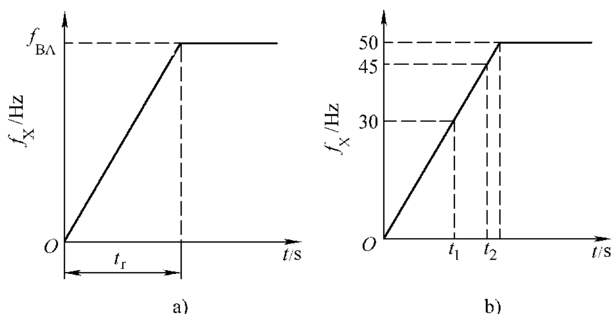


图 3-27　加速时间
a）加速时间定义　b）一段加速时间的计算

问题 35　决定加速时间的主要依据是什么?

主要依据有两个方面：

1. 电力拖动系统的惯性　在变频器的输出频率上升的过程中，电动机转子的转速只有在能够跟得上频率上升的情况下，才能将加速过程中的电流限制在允许范围内。所以：

（1）惯性较大者　加速时间应适当长一些；

（2）惯性较小者　加速时间可以适当缩短一些，如图 3-28 所示。

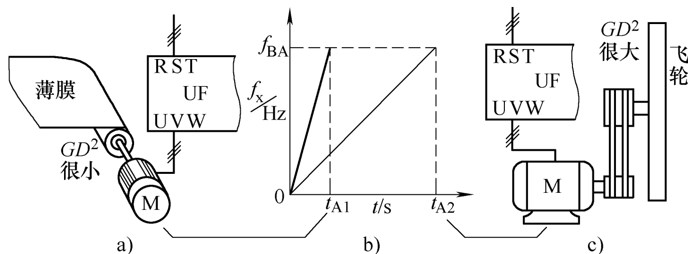


图 3-28　加速时间与惯性
a）小惯性负载　b）加速时间　c）大惯性负载

2. 生产机械对加减速时间的要求　不同的生产机械，对加速时间的要求也是不一样的，举例说明如下：

（1）对于部分起动与制动比较频繁的机械来说，由于电力拖动系统的加速过程属于不进行生产的过渡过程。因此，从提高劳动生产

率的角度出发，要求尽量缩短加速时间和减速时间。图 3-29a 所示的龙门刨床是反复地作往复运行的，起、制动比较频繁。为了提高劳动生产率，要求尽量缩短其加速过程。

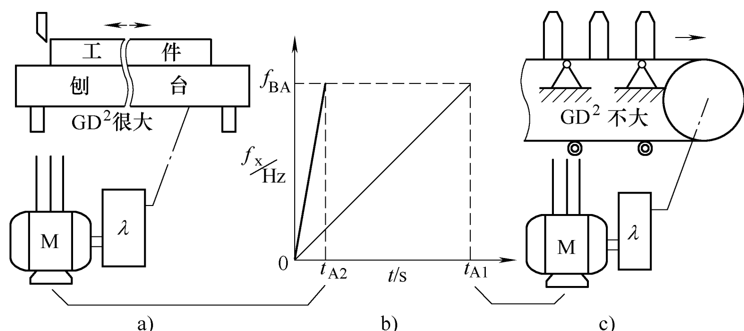


图 3-29　加速时间与负载要求

a）惯性大加速快　b）加速时间　c）惯性小加速慢

（2）对于部分起、制动并不频繁的生产机械，出于对生产实际的要求，希望在加、减速过程中尽量减小速度的变化。例如，玻璃瓶输送带在生产过程中是长时间运行的，起动与制动的次数很少。另一方面，在起动与制动过程中，以及在调整转速过程中，如果加速度太大，容易使玻璃瓶倾倒，故要求加、减速时间预置得长一些，如图 3-29c 所示。

因此，在预置加速时间时，既要考虑生产机械对过渡过程的要求，又要注意电力拖动系统惯性的大小，来进行适当预置。

问题 36　怎样了解电力拖动系统转动惯量的大小？

首先，使拖动系统全速运行（工作频率为 50Hz），然后切断电源，使电力拖动系统处于自由制动状态，用秒表计算其转速降到 0r/min 所需要的时间，即可以大致知道其转动惯量的大小了，如图 3-30 所示。

图中，t_D 是自由制动时间，τ_1 是时间常数。

通常，时间常数可按自由制动时间的 1/5 到 1/3 来估算：

$$\tau_1 \approx \frac{t_D}{5} \sim \frac{t_D}{3}$$

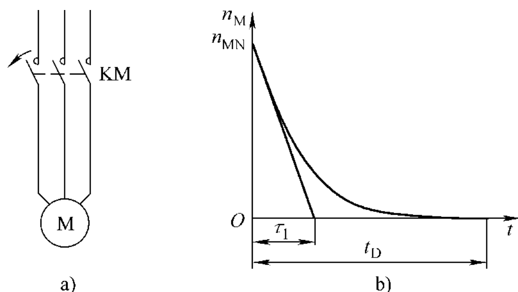


图 3-30　自由制动时间的粗测

a）切断电源　b）自由制动下降曲线

问题 37　上、下限频率是根据什么设定的?

上、下限频率是根据生产机械的工艺要求所规定的最高和最低工作频率。

1. 对于上限频率

（1）上限频率不得超过最高频率；

（2）当上限频率低于最高频率时，实际运行的最高频率是上限频率。

2. 对于下限频率

（1）当通过接通 FWD—COM 来起动和停止电动机时，起动时，频率从 0Hz 开始上升；停止时，频率将一直下降到 0Hz。

（2）在运行过程中，通过调节电位器 RP 来调节变频器的输出频率时，其最低频率是下限频率，如图 3-31 所示。

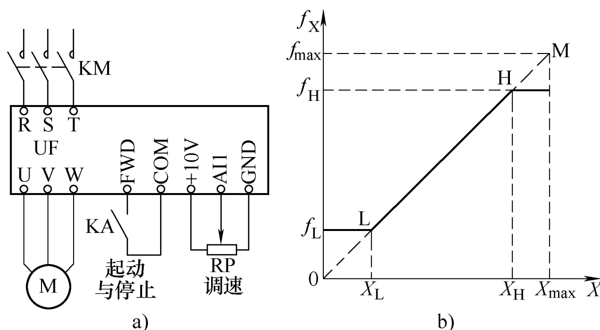


图 3-31　上、下限频率与起动

a）起动、停止和调速　b）上、下限频率定义

问题 38　什么是 S 形加、减速方式?

所谓 S 形加、减速曲线，就是在加速（或减速）过程的起始阶段和终了阶段，使变频器的输出频率上升得缓慢一些，或者说，使加速度有一个逐渐加大和逐渐减小的过程，如图 3-32a 所示。

不同的变频器对加速方式的预置方法也不一样，图 3-32a 是比较典型的一种，需要预置“加速开始时 S 形时间”t_{AS1}、“加速终了时 S 形时间”t_{AS2}、“减速开始时 S 形时间”t_{DS1}、“减速终了时 S 形时间”t_{DS2}。当 t_{AS1}、t_{AS2}、t_{DS1}、t_{DS2}中有一个为 0 时，就成为半 S 形加、减速曲线，如图 3-32b 所示。

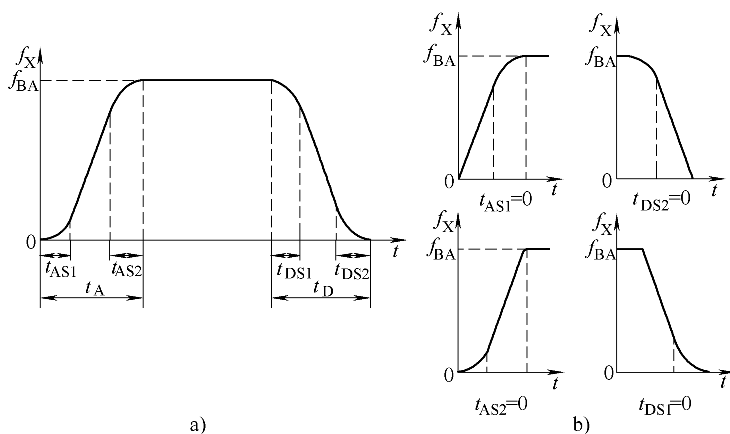


图 3-32　S 形加、减速方式
a）S 形加、减速曲线　b）半 S 形加、减速曲线

需要预置 S 形加速方式的场合有：

（1）对加速度响应比较敏感的场合　如玻璃瓶输送带，若速度变化太快，容易使玻璃瓶倾倒；又如电梯，如速度变化太快，会使乘客感到不舒适。

（2）惯性较大的电力拖动系统　起动时减缓转速变化，有利于从静止状态逐渐起动起来；停止加速时减缓转速变化，有利于防止因转速上升过多而形成振荡。

问题 39 某风机在低速时起动电流不大，在起动到将近 50Hz 时容易跳闸，如何缩短加速起动时间？

风机在低速时阻转矩很小，加速过程可以快一些，所以一般来说，在 0～40Hz 的加速过程中，是不需要 S 形加速的。

但随着转速的逐渐升高，阻转矩按二次方规律加大，故加速到转速较高时，容易因加速电流过大而跳闸，加速过程应该逐渐减慢。

这就是说，在加速的起始阶段不需要 S 形，而只在结束阶段采用 S 形加速方式，如图 3-33b 所示。

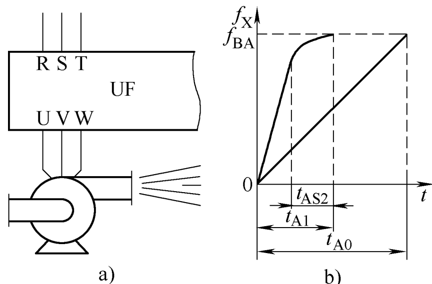


图 3-33 风机的加速设定
a）风机变频 b）加速方式

由图可知，采用了半 S 形加速方式后，非但缩短了加速时间，还减小了起动电流。

问题 40 由于带式输送机静摩擦力较大而难以起动，怎么办？

带式输送机如图 3-34a 所示。

一方面，在静摩擦力较大的场合，应该预置起动频率，使负载在起动时有一点冲击力，以帮助它克服静摩擦力；

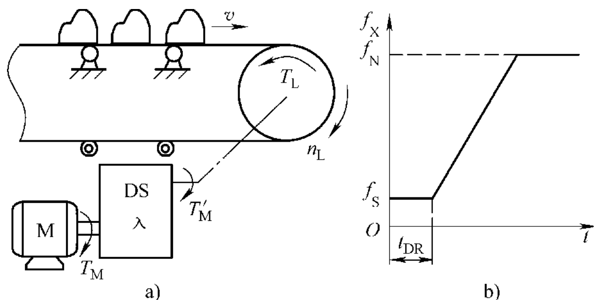


图 3-34 暂停升速功能之一
a）带式输送机示意图 b）暂停升速功能

另一方面，使负载在起动频率 f_S 下运行一个短时间，确保它已经运转起来后再升速。这种在较低转速下运行一个短时间的功能，称为暂停升速功能，如图 3-34b 所示。

暂停升速功能也可用于某些惯性较大的负载中。

暂停升速的时间 t_{DR} 可以由用户根据负载的具体情况进行预置。

问题 41　起动频率以多大为宜?

1. 恒转矩负载　一般情况下，以起动时电动机的同步转速不超过额定转差为宜。例如，Y-132M-4 电动机（7.5kW）的额定转速为 $n_{MN}=1440\text{r/min}$，则额定转差为

$$\Delta n=(1500-1440)\text{r/min}=60\text{r/min}$$

和额定转差对应的频率是

$$\Delta f=\frac{p\Delta n}{60}=\frac{2\times 60}{60}\text{Hz}=2\text{Hz}$$

则起动频率的预置范围应该是

$$f_S\leqslant 2\text{Hz}$$

个别情况下，如需要进一步加大起动转矩，起动频率的上限值 f_{SH} 也以不超过 5Hz 为宜：

$$f_{SH}\leqslant 5\text{Hz}$$

2. 二次方律负载　由于二次方律负载在低速时的阻转矩很小，故起动频率可以适当升高：

$$f_{SH}\leqslant 10\text{Hz}$$

问题 42　某机床起动时齿轮箱齿轮间有撞击，影响齿轮的寿命，能否缓解?

齿轮箱的齿轮之间总是存在间隙的，其工作特点如下：

如图 3-35a，在停机过程中，其啮合点为 A 点，B1 和 B2 处于分开状态；

起动时，B1 与 B2 将啮合，并且在开始啮合时将发生撞击，如果转速上升太快，撞击力太大，将影响齿轮的寿命。

为了减轻在起动过程中齿轮间的撞击力，也可预置一个暂停升速的时间 t_{DR}。但这时，变频器应该从 0Hz 开始起动，如图 3-35b 所示。就是说，电动机从零速开始缓慢地起动，又在极低频率下运行一个短时间，使齿轮的齿之间充分啮合后再开始升速。从而有效地减缓了轮

齿间的撞击。

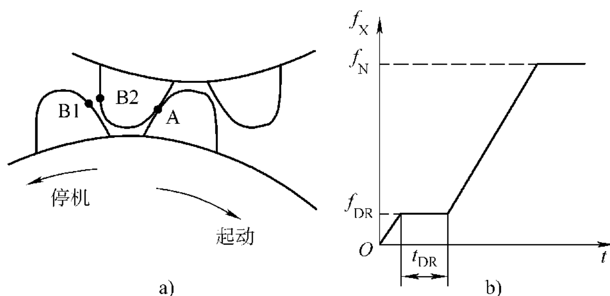


图 3-35 暂停升速功能之二

a）齿轮的工作特点 b）暂停升速功能

问题 43 风机在不工作时，叶轮因自然通风而倒转，如何处理？

风机在停机状态下，叶片由于自然通风而自行转动时，通常是反转的。在这种情况下，即使变频器的输出频率（从而同步转速 n_0）从 0Hz 开始上升，也会在起动瞬间引起电动机的过电流。

此外，如果电力拖动系统在停机时预置了自由制动（惯性制动）方式，则当系统尚未停住前，如果需要再次从 0Hz 开始起动，也会在起动瞬间引起电动机的过电流。

总之，如果电力拖动系统由于某种原因在非零速的状态下起动时，变频器将很容易因过电流而跳闸。

为了保证电动机在零速状态下开始起动，可在起动前先向电动机的定子绕组内通入直流电流，待电动机的转子停住后再升速，如图 3-36 所示。图 3-36a 是电动机的升速状况；图 3-36b 是直流制动的预置项目。这种通过在定子绕组中加入直流电流来保证负载在零速下起动的功能称为起动前的直流制动功能。

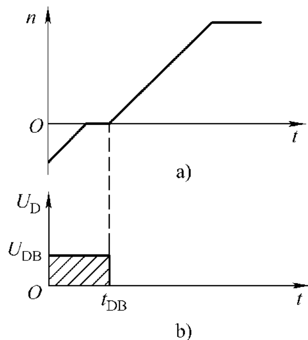


图 3-36 起动前直流制动

a）升速状况 b）直流参数

不同变频器对于起动前直流制动

功能的设置不尽相同。多数变频器可以预置直流电压 U_{DB} 的高低和进行直流制动的时间 t_{DB}，如图3-36b所示。但也有的变频器只需预置起动前直流制动有效即可，具体参数由变频器内定。

问题44　给定信号不为“0”时，怎样起动电动机?

1. 给定信号不为0的情况

（1）上次运行后，停机时因预置了“记忆”功能，而保留了停机前的频率给定信号；

（2）外接电位器给定时，电位器的滑动触点不在“0”位，如图3-37b所示。

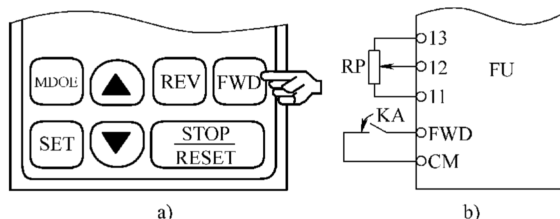


图3-37　电动机的起动操作

a）键盘操作　b）外接控制起动

2. 起动方法

（1）键盘起动　按键盘上的正转键（FWD）或运行键（RUN），如图3-37a所示，电动机将从起动频率开始起动；

（2）外接控制端子起动　如图3-37b所示，将外接控制端子中的正转端子（FWD）或运行端子（REV）接通，就可使电动机从起动频率开始起动。

问题45　变频起动和软起动器起动有什么区别?

软起动实际上就是无级减压起动。异步电动机在改变电源电压时，其机械特性的临界转差是不变的，但临界转矩减小较多。因此，在低压起动时，起动转矩将大幅减小，如图3-38a所示。

实现变频调速后，因变频器有各种补偿功能和矢量控制功能，电动机的机械特性将大为改善，可以保证有较大的起动转矩，如图3-38b所示。

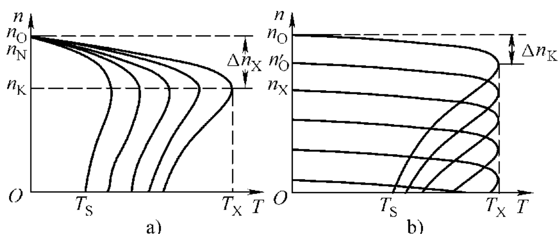


图 3-38　软起动与变频起动
a）软起动机械特性　b）变频起动机械特性

3.5　降速和停机功能

问题 46　电动机在降低频率时有什么特点？

这里所说的降低频率，专指在降低频率的过程中发生的现象。而不是降低频率后的运行状态。

1. 正常运行状态　假设某 4 极电动机，减速前在额定转速下运行，其基本状态如图 3-39a 所示：同步转速为 1500r/min，运行转速为 1480r/min。转子绕组以转差（20r/min）反方向切割磁力线而产生感应电动势和电流，感应电流与磁通相互作用而产生的电磁转矩 T_M 是驱动转子旋转的电磁转矩，如图 3-39a 所示。

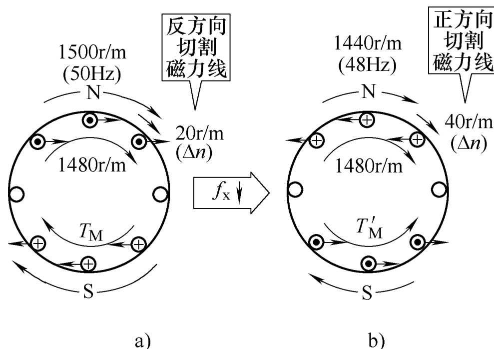


图 3-39　降速时的电动机状态
a）减速前的状态　b）频率刚下降的状态

2. 频率刚下降时的状态　今将频率下降为 48Hz，当频率刚下降的瞬间，旋转磁场的转速（同步转速）立即下降为 1440r/min，但由于电力拖动系统具有惯性的缘故，电动机转子的转速不可能立即下降，仍为 1480r/min。于是，转子的转速超过了同步转速，转子绕组切割旋转磁场的方向和原来的相反了。从而，转子绕组中感应电动势和感应电流的方向，以及所产生的电磁转矩的方向都和原来相反了，电动机处于发电状态，如图 3-39b 所示。由于所产生的电磁转矩和转子旋转的方向相反，能够促使电动机的转速迅速地降下来，故也称为再生制动状态。

问题 47　异步电机是怎样发电的？

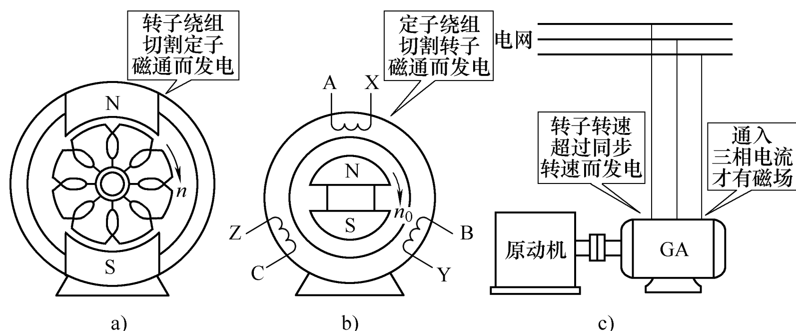


图 3-40　各种发电机的特点

a）直流发电机　b）同步发电机　c）异步发电机

首先看一下非异步电机的发电特点：

1. 直流发电机　定子是磁极，转子是电枢。当原动机带动转子旋转时，电枢绕组切割定子磁场而发电。

2. 同步发电机　定子是三相绕组，转子是磁极。当原动机带动转子旋转时，定子的三相绕组因切割转子磁通而发电。

以上两种发电机有一个共同的特点，都是由绕组切割磁场而发电的。但异步电机里没有专门的磁极，要想产生磁场，必须先把三相绕组和三相电源相接，如果没有原动机的话，它就是一台电动机。而如果用一台原动机带动它，使转子的转速超过了同步转速的话，它就成为发电机了。

就是说，异步电机要想发电，必须有两个条件：

（1）必须和电网的三相电源相连接，这样才能产生磁场；

（2）转子的转速必须超过同步转速，使转子绕组同方向切割旋转磁场。

问题 48　异步电动机在什么情况下能够发电？

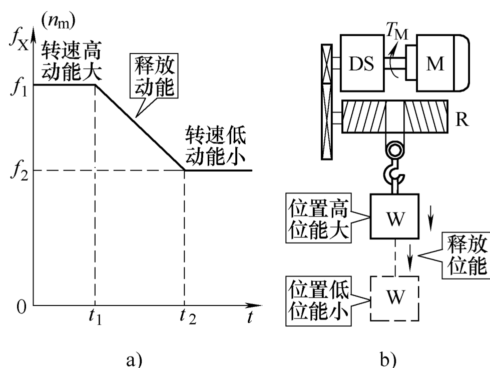


图 3-41　异步电动机两种发电状态

主要有两种情况：

1. 电动机的工作频率下降　具体过程已如上述。当电动机在较高频率下运行时，因为转速较高，电力拖动系统的动能较大。而在频率下降的过程中，因为转速在降低，故电力拖动系统的动能也在减小。所以，频率下降的过程，也是电力拖动系统释放动能的过程。

2. 起重机械的重物下降　重物下降时，在重物的重力加速度作用下，转子的转速也将超过同步转速，而使电动机处于再生制动状态。重物在高处时，位能较大，重物下降时，位能将减小。所以，重物下降的过程，也是电力拖动系统释放位能的过程。

总之，电力拖动系统在释放能量的过程中，所释放的能量将转换成电能，从而使电动机处于再生制动状态。

问题 49　异步电动机的发电状态有什么特点？

在电动机里，定子电流是由转子电流和励磁电流合成的，即

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2' + \dot{I}_0 \tag{3-2}$$

式中　$\dot{I}_1$——定子电流（A）；

$\dot{I}_2'$——转子的折算电流（A）；

$\dot{I}_0$——励磁电流（A）。

1. 电动状态的特点　如图 3-42a 所示，在电动状态下，定子电流比电压滞后的电角度 φ_1 是小于 $\pi/2$ 的，φ_1 对应的时间是 t_1。由曲线图可知，在 t_1 时间内，电流和电压的方向是相反的，实际上，这是定子绕组的自感电动势（反电动势）克服了电源电压而作功，或者说是磁场向电源反馈能量而作功。

因为 φ_1 小于 $\pi/2$，所以磁场向电源反馈能量的时间较短，大部分时间则是电动机吸收电功率，是电源在作功。

2. 发电状态的特点　如图 3-42b 所示，在发电状态下，定子电流比电压滞后的电角度 φ_2 大于 $\pi/2$，φ_2 对应的时间是 t_2。由曲线图知，在 t_2 时间内，是定子绕组的自感电动势克服了电源电压而作功，或者说是磁场在向电源反馈能量而作功。

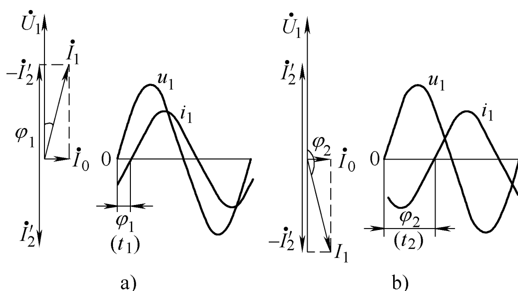


图 3-42　异步电动机再生制动的特点

a）电动机状态　b）发电机状态

因为 φ_2 大于 $\pi/2$，所以大部分时间是磁场向电源反馈能量，成为了发电状态。

所以，异步发电机并不能如直流发电机和同步发电机那样，从没有电能“产生”出电能来。异步电机的发电，是在电动机的磁场和电源交换能量的过程中，从电动机反馈给电源的能量比电源输入给电动机的能量较大而已。也就是说，不论是电动状态，还是发电状态，始终存在着电动机的磁场和电源之间交换能量的过程，区别仅在于：

当吸收的能量大于反馈能量时，是电动状态，而当反馈的能量大于吸收的能量时，是发电状态。

问题 50　什么是泵升电压？

如上所述，在频率下降（减速）的过程中，电动机处于再生制动状态，电流滞后于电压的相位差大于 π/2，所以大部分时间是电动机反电动势在向滤波电容器充电，且充电电流较大；小部分时间是滤波电容器向电动机放电，放电电流较小。很明显，在滤波电容器上是充电多，而放电少。于是，直流电压上升，称为泵升电压。

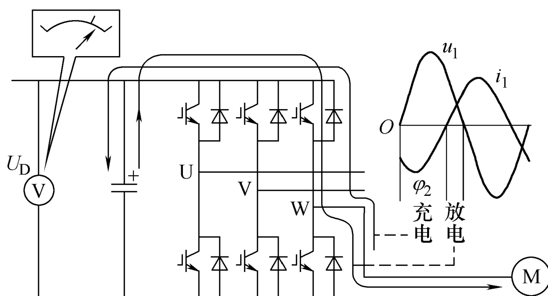


图 3-43　泵升电压

问题 51　什么是减速时间？

1. 减速时间的定义　变频器的输出频率从基本频率下降到 0Hz 所需要的时间，称为减速时间，用 t_D 表示，如图 3-44a 所示。

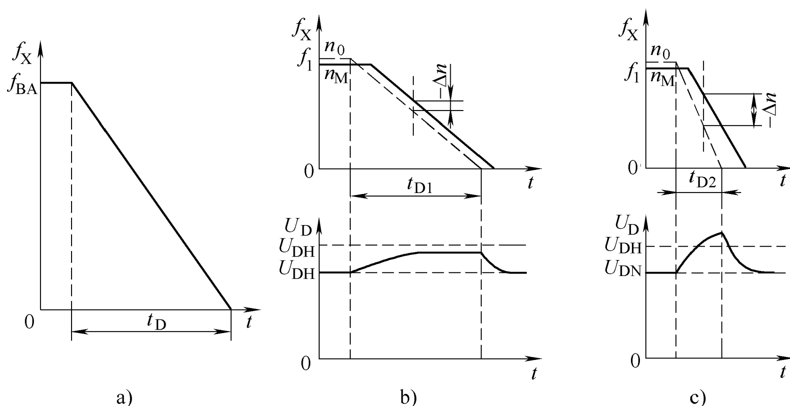


图 3-44　减速时间与直流电压

a）减速时间定义　b）减速慢　c）减速快

2. 减速时间对直流电压的影响

（1）减速时间长　如减速时间预置得长，则频率下降得慢，电动机转子的转速跟得上同步转速的下降，在减速过程中保持较小的转差，泵升电压较小，不会超过上限值，如图 3-44b 所示。

（2）减速时间短　如减速时间预置得短，则频率下降得快，电动机转子的转速将跟不上同步转速的下降，在减速过程中的转差增大，泵升电压也较高，直流电压将超过上限值，导致变频器因过电压而跳闸，如图 3-44c 所示。

问题 52　斜坡制动和惯性制动有什么区别？

所谓斜坡制动，就是变频器的输出频率按预置的减速时间逐渐下降，如图 3-45a 所示。由于电动机转速的下降呈斜坡状，故也称斜坡制动。

惯性制动也叫自由制动，这时，变频器的逆变桥处于封锁状态，电动机转速的下降时间由电力拖动系统的惯性来决定，处于不受控制的状态，如图 3-45b 所示。

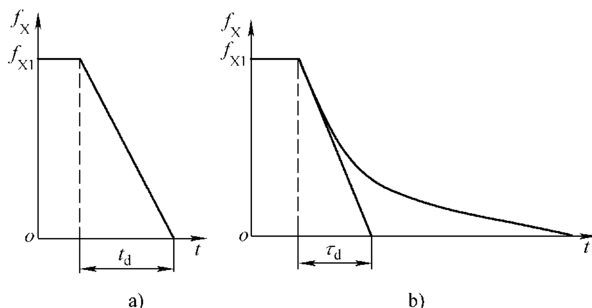


图 3-45　斜坡制动和惯性制动
a）斜坡制动　b）惯性制动

问题 53　怎样使电动机快速而准确地停机？

1. 制动方法　在电动机的两个接线端子上施加降低了的直流电压，向电动机的定子绕组里通入直流电流，如图 3-46a 所示。

2. 制动原理　定子绕组里通入直流电流后，将产生在空间静止的直流磁场。当转子由于惯性而继续旋转时，转子绕组将切割静止磁场而产生感应电动势和电流。感应电流又和静止磁场相互作用，产生

电磁转矩，其方向与转子的旋转方向相反，是制动转矩，如图 3-46b 所示。这种方法，称为能耗制动。因为是依靠直流磁场来产生制动转矩的，故也叫直流制动。

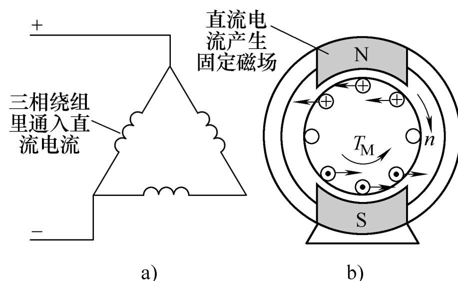


图 3-46　异步电动机的能耗制动
a）定子直流绕组中通入直流电流　b）电磁转矩

问题 54　变频器怎样实现直流制动?

1. 直流制动的实施

（1）六个逆变管中，封锁四个，使电动机绕组中通入直流电流，如图 3-47a 所示。

（2）减小脉冲的占空比，以降低施加于定子绕组的电压大小。

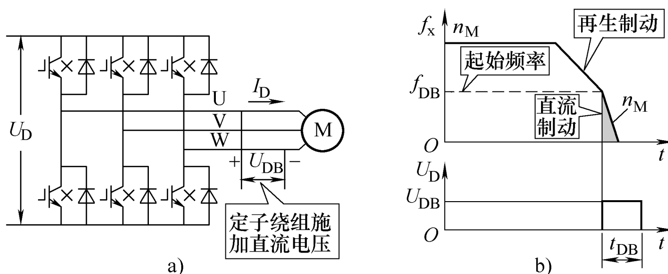


图 3-47　变频器的直流制动
a）逆变管状态　b）需要预置的功能

2. 直流制动功能的预置

（1）直流制动的起始频率 f_{DB}　在大多数情况下，直流制动都是和再生制动配合使用的，即首先用再生制动方式将电动机的转速降至

较低转速，然后再转换成直流制动，使电动机迅速停住。其转换时对应的频率即为直流制动的起始频率f_{DB}，如图3-47b所示。

预置起始频率f_{DB}的主要依据是负载对制动时间的要求，要求制动时间越短，则起始频率f_{DB}应越高。一般说来，以不高于25Hz为宜：

$$f_{DB} \leqslant 25\text{Hz}$$

（2）直流制动强度　即在定子绕组上施加直流电压U_{DB}或直流电流I_{DB}的大小，它决定了直流制动的强度，如图3-47b所示。

预置直流制动电压U_{DB}（或制动电流I_{DB}）的主要依据是负载惯性的大小，惯性越大者，直流制动强度（U_{DB}或I_{DB}）也应越大。多数情况下，直流电压以不大于30V为宜：

$$U_{DB} \leqslant 30\text{V}$$

（3）直流制动时间t_{DB}　即施加直流制动的时间长短。

预置直流制动时间t_{DB}的主要依据是负载是否有“爬行”现象，以及对克服“爬行”的要求，要求越高者，t_{DB}应适当长一些。一般来说，以0.5～2s为宜：

$$t_{DB} \approx (0.5 \sim 2)\text{s}$$

问题55　有的变频器允许在额定频率下实施直流制动，可以既不需要制动电阻，又能快速地停住，是否算是一种较好的停机方式？

在额定频率下实施直流制动，虽然可以使拖动系统快速停机，但在高速情况下施加强力的制动转矩时，电动机以及传动机构各部分的传动轴将受到很大的剪切力，影响其寿命。严重时，传动轴可被剪断。

所以，除非有特殊需要，一般不宜在高速情况下直接进行直流制动。

问题56　直流制动能否代替电磁制动电磁铁？

不可以。主要原因如下：

（1）直流制动时间不能太长　直流制动电流一般大于电动机的额定电流，故通电时间不宜太长；

（2）直流制动的制动力不足　在电动机不转的情况下，定子磁场对转子的吸引力与电磁制动电磁铁相比，相去甚远；

（3）直流制动无法防止一旦停电时产生的问题　电磁制动电磁铁在电路中通常设计成：得电时松开，断电时抱紧。这样，一旦电源发生故障而停电时，制动电磁铁仍处于抱紧状态，不会出现危险。变频调速的直流制动则不可能在停电的情况下吸住转子。

问题 57　如果选择了自由制动方式，应注意哪些问题？

使用“自由制动”方式应注意的事项主要有：

（1）应注意避免电动机在尚未停住时再起动。所以，自由制动只能用于停机时间较长的场合；

（2）必须具体情况具体分析。例如，对于供水系统中的水泵，如使用“自由制动”方式，电动机会立即停住，容易产生“水锤效应”，故不应采用自由制动方式。而应使电动机在一定的“降速时间”内逐渐地停下来。

问题 58　在预置了下限频率后，变频器怎样停机？

在预置了下限频率的情况下，依靠减小给定信号是不能使变频器的输出频率下降为 0Hz 的。停机的方法如下：

1. 键盘操作　按键盘上的 STOP 键，使电动机停机，如图 3-48a 所示；

2. 外接控制端子操作　如图 3-48b 所示，将外接控制端子中的正转端子（FWD）或运行端子（RUN）断开，就可使电动机停机。

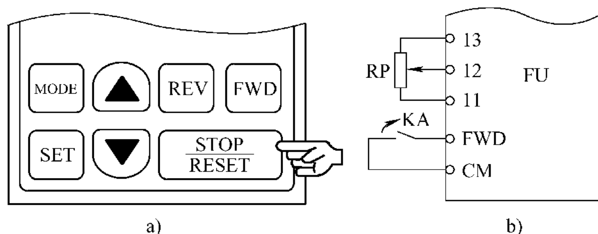


图 3-48　预置了下限频率时的停机方式

a）键盘操作　b）外接控制端子操作

问题 59　风机在自由制动时，因为惯性大，停机时间很长，能否使它发电？

不能。

异步电动机要发电，必须首先建立磁场。在自由制动状态下，变频器的逆变电路已被封锁，电动机的定子绕组中没有电流，产生不了磁场。所以，即使转子在旋转，因并未切割磁力线，是发不了电的。

再生制动时，变频器的逆变电路在工作，电动机有定子磁场，所以能够发电。

问题60　在降速或停机过程中怎样防止直流电压过高？

1. 将变频器的自动电压调整（AVR）功能预置为“有效”　大多数变频器中，都具有自动电压调整（AVR）功能，即自动调整变频器输出电压的功能。拖动系统在降速或停机过程中，由于直流电压的升高，变频器的输出电压也必升高。这时，变频器将自动地降低其输出电压，从而减小电动机的磁通，以达到减小再生电流的目的。但这种方法只能用在直流电压上升较慢的场合。

2. 采用制动电阻和制动单元　在直流电压上升较快的场合，应接入制动电阻和制动单元，将直流回路多余的电荷释放掉，详见下述。

3. 采用电磁制动器　利用机械式的电磁制动器将电动机的轴抱紧，以达到迅速停机的目的。这是工频运行时常采用的办法。在变频调速系统中，如需要在停机后把电动机轴抱紧的话，通常也是配合制动电阻和制动单元，先通过再生制动将转速降得很低时，再把轴抱紧。

3.6　制动电阻与制动单元

问题61　在哪些情况下需要配制动电阻？

总的原则是：如果因再生制动导致直流电路容易过电压的话，必须配制动电阻，将滤波电容器上多余的电荷释放掉，如图3-51所示。

图中，制动单元BV的作用是：当直流电压U_D超过一定限值时，BV导通，使电容器通过制动电阻R_B放电；当直流电压U_D降到限值以内时，BV截止，停止放电。

在具体工作中，有必要考虑配制动电阻的场合有：

（1）起动和制动比较频繁的场合；

（2）要求快速制动的场合；

（3）有位能负载的场合，如起重机械等。

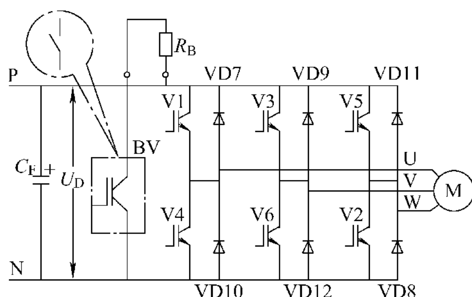


图 3-49　制动电阻和制动单元

问题 62　怎样决定制动电阻的阻值?

准确计算制动电阻的方法是比较麻烦的，必要性也不大。这里介绍的是根据各说明书提供的数据统计而得的粗略算法。

1. 粗略算法　当通过制动电阻的电流等于电动机额定电流的 50% 时，所得到的制动转矩约等于电动机的额定转矩，用公式表达如下：

如
$$I_B=\frac{U_{DH}}{R_B}=0.5I_{MN} \tag{3-3}$$
$$T_B\approx T_{MN}$$

式中　I_B——通过制动电阻的电流（A）；
U_{DH}——直流电压的上限值（V）；
R_B——制动电阻的阻值（Ω）；
I_{MN}——电动机的额定电流（A）。
T_B——制动转矩（N · m）；
T_{MN}——电动机的额定转矩（N · m）。

在满足 $T_B\approx T_{MN}$ 的情况下，制动电阻可计算如下：

$$R_B=\frac{2U_{DH}}{I_{MN}} \tag{3-4}$$

2. 制动电阻的取值范围　各变频器生产厂家为了减少制动电阻的阻值档次，常常对若干种不同容量的电动机提供阻值相同的制动电阻。因此，在制动过程中所得到的制动转矩的差异是较大的。统计结

果表明：

（1）制动转矩的估算及取值范围　如上述，制动转矩可估算如下：

$$T_B \approx \frac{2I_B}{I_{MN}} T_{MN} \tag{3-5}$$

通常取　$T_B = (0.8 \sim 2.0) T_{MN}$

（2）制动电阻的取值范围

$$R_B = \frac{2.5U_{DH}}{I_{MN}} \sim \frac{U_{DH}}{I_{MN}} \tag{3-6}$$

可以看出，制动电阻的大小，是允许在一定范围内变动的。

问题 63　怎样决定制动电阻的功率？

在决定制动电阻的容量时，必须注意根据具体情况进行具体处理。

1. 电路导通时电阻消耗的功率　当制动电阻接入电路时，它所消耗的电功率：

$$P_{B0} = \frac{U_{DH}^2}{R_B} \tag{3-7}$$

式中　P_{B0}——制动电阻接入电路时消耗的功率（kW）。

2. 制动电阻的工况　制动电阻的工况可分为：

（1）不重复放电　惯性较大的负载，如要求减速时间较短时，直流电压容易超过限值，如图 3-52a 所示。图中，R_B 是制动电阻，BV 是制动单元；图 b 是不反复制动的工况；图 c 是反复制动的工况，U_{DN}是额定状态下的直流电压值，U_{DH}是直流电压的上限值；ON 表示通电，OFF 表示断开。

由图知，能耗电路放电的时间是很短的，制动电阻处于短时运行的状态。显然，制动电阻的容量没有必要按式（3-7）来选择，而可以进行较大幅度的修正。

（2）频繁加、减速时的重复放电　在加、降速比较频繁的情况下，为了减小过渡过程的时间，一般要求尽量缩短加速过程和减速过程。

由图 c 知，制动电阻处于断续运行的状态。其容量也没有必要按式（3-7）来选择，也可以进行修正。

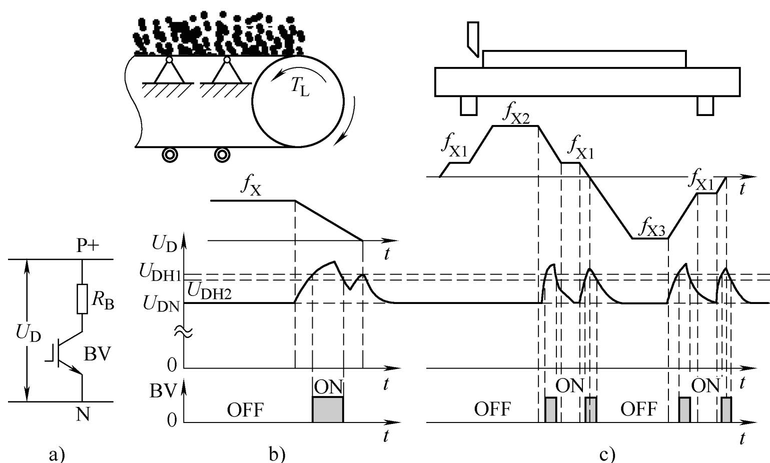


图 3-50　制动电阻的工况

a）电路　b）不反复制动　c）反复制动

3. 电阻容量的修正　由上述，制动电阻常常是处于断续运行甚或短时运行的状态下。所以，实际所需容量应在式（3-7）的基础上进行适当修正：

$$P_B = P_{B0}\alpha_B \qquad (3\text{-}8)$$

式中　α_B——修正系数。

根据各变频器说明书所提供相关数据的统计结果，修正系数 α_B 的粗略取值如下：

$P_{MN} \leqslant 18.5\text{kW} \rightarrow \alpha_B = 0.11 \sim 0.3$；

$P_{MN} \geqslant 22\text{kW} \rightarrow \alpha_B = 0.25 \sim 0.4$

问题 64　按照说明书选择制动电阻有问题吗？

一般情况下，应该是没有问题的。

但如上述，变频器生产厂为了减少制动电阻的档次，常常对若干种不同容量的电动机提供相同阻值和容量的制动电阻。例如，安圣 TD3000 系列变频器说明书中，对于配用电动机容量为 22kW、30kW 和 37kW 的变频器，所提供的制动电阻规格，都是 3kW、20Ω。选用时，应注意根据生产机械的具体情况进行调整。

1. 调整的主要依据

（1）负载对减速时间的要求　减速时间越短，则泵升电压大，制动电阻的阻值应取偏小值；

（2）拖动系统的惯性大小　惯性越大，则在减速时间相同的情况下，则泵升电压大，制动电阻的阻值也应取偏小值。

2. 调整的基本原则　在满足要求的情况下，基本原则如下：

（1）制动电阻的阻值　电阻值大，则消耗功率小，对逆变电路的冲击也小，故电阻值宜大不宜小；

（2）制动电阻的容量　容量大，则热容量大，不易损坏。所以，容量也是宜大不宜小。对于起重机械下放重物的场合，则由于在下放重物的整个过程中，电动机一直处于再生制动状态，制动电阻的运行时间较长，通常取：$\alpha_B \approx 0.85$。

问题 65　怎样进行制动电阻的热保护？

可以用热继电器进行保护，要点如下：

1. 热继电器的位置　应尽量放在发热最严重的地方。

2. 发热元件　热继电器的发热元件应该和制动电阻串联，如图 3-53 所示。

3. 热继电器触点　可将热继电器的动合（常开）触点接到变频器的一个可编程输入控制端（如 X7），并将该输入端预置为“外部故障信号输入”。当热继电器因过热而动作时，变频器将得到外部故障信号而跳闸，并进行显示。

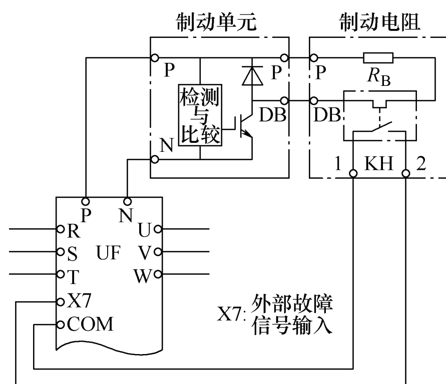


图 3-53　制动电阻的热保护

问题 66　怎样进行制动电阻的并联？

当两个或多个制动电阻并联时，需要注意的问题如下：

1. 制动单元　当有两个或多个制动电阻并联时，必须计算制动电流的大小，和核实制动单元的承受能力。必要时，应更换制动单元。

2. 发热元件　各制动电阻仍由各自的热继电器进行保护

3. 热继电器触点　各热继电器的触点相互并联。这样，不管哪个制动电阻过热，都将进行保护，如图 3-54 所示。

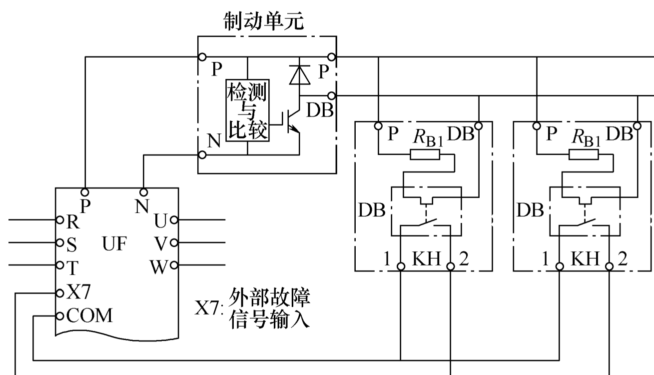


图 3-54　制动电阻的并联

问题 67　制动电阻经常因过热而报警，怎么处理？

首先要观察过热的程度。

如过热程度较轻，则设法加强制动电阻的散热；

如过热程度相当严重，则须考虑更换制动电阻，原则如下：

在制动转矩较大的情况下，首先考虑增大电阻值。如式（3-7），电阻值增大后，电阻的容量可以减小；

如果是起重机械放下重物的情况下，则因为对制动转矩的要求较高，应考虑加大制动电阻的容量。

问题 68　自己能否制作制动电阻？

变频器说明书中提供的制动电阻的容量，是针对一般降速时计算的。如果起动和停机特别频繁，或在重力负载向下运行时，制动电阻常常因容量太小而烧坏。

1. 替代器件　一般情况下，制动电阻可以用电炉丝或其他电热设备中的发热元件来代替。由于发热元件的额定电压通常是 220V，而处于再生制动状态的直流回路的平均电压约为 650V，故发热元件应以三组串联为宜，如图 3-55 所示。

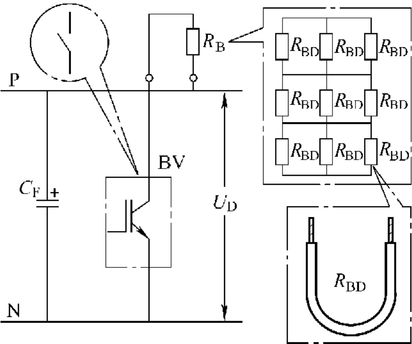


图 3-55　自制制动电阻

2. 发热元件电阻值的计算　发热元件的额定数据只有两个：额定功率和额定电压。

上述数据是在发热状态下的数值。根据额定数据，其热态电阻值可计算如下：

$$R_E = \frac{U_{EN}^2}{P_{EN}} \tag{3-9}$$

式中　P_{EN}——发热元件的额定功率（W）；

U_{EN}——发热元件的额定电压（V）；

R_E——发热元件的热态电阻（Ω）。

由于总体上说，制动电阻并不处于连续工作的状态。接入电路的时间通常是断续的。因此，发热元件作为制动电阻使用时，其实际温度达不到电热设备的温度。所以，由式（3-9）计算出的热态电阻值，与冷态或温态时的电阻值相比，略微偏大一些。但因为电热设备的工作温度一般在 200℃ 以内，热态电阻与冷态电阻的差别并不很大，故式（3-9）的计算结果是可用的。各种规格发热元件的电阻值见表 3-1。

表 3-1　各种规格发热元件的电阻值

额定功率/W	热态电阻值/Ω	额定功率/W	热态电阻值/Ω
100	484	1500	32
300	161	2000	24. 2
500	96. 8	3000	16
1000	48. 4	5000	9. 7

3. 计算举例　现以某 37kW 电动机为例，说明书中的原配制动电阻是 20Ω，5kW。

在再生制动过程中，直流电压的平均值以 650V 计，则制动电阻接入电路时消耗的功率：

$$P_{B0} = \frac{650^2}{20} = 21125\text{W} \approx 21\text{kW}$$

则说明书中制动电阻的修正系数：

$$\alpha_B = \frac{5}{21} = 0.238 \approx 0.24$$

对于起动与制动比较频繁的负载，以及对于向下运行的重力负载来说，上述修正系数显然是太小了。

用发热元件代替的方案可有多种，例如，用 9 根 2kW 的发热元件串、并联来代替，如图 3-55 所示。则：

（1）合成热态电阻 R'_B 的大小为

$$R'_B = 24.2\Omega$$

冷态电阻值接近于 20Ω。

（2）总的额定功率

$$P'_B = 2 \times 9 = 18\text{kW}$$

修正系数增大为

$$\alpha'_B = \frac{18}{21} = 0.857 \approx 0.86$$

应该说，制动电阻的容量已经足够了。

用发热元件作制动电阻时，非但价格比较低廉，并且在安装时可以根据用户的具体情况灵活安排。

问题 69　制动单元是怎样工作的？

制动单元的功能：当直流回路的电压 U_D 超过规定的限值 U_{DH} 时，接通耗能电路，使直流回路通过制动电阻 R_B 释放能量。其基本构成如图 3-56 的虚线框所示，分述如下：

（1）功率管 V_B　用于接通与关断能耗电路，是制动单元的主体。

（2）电压取样与比较电路　由于功率管 V_B 的驱动电路是低压电路，故只能通过电阻 R_{S1} 和 R_{S2} 进行分压，按比例取出 U_D 的一部分 U_S 作为采样电压，和稳定不变的基准电压 U_A 进行比较，得到控制 V_B

导通或截止的指令信号。基准电压 U_A 的大小应与限值 U_{DH} 成比例。

（3）驱动电路　驱动电路用于接受比较电路发出的指令信号，驱动 V_B 导通或截止。

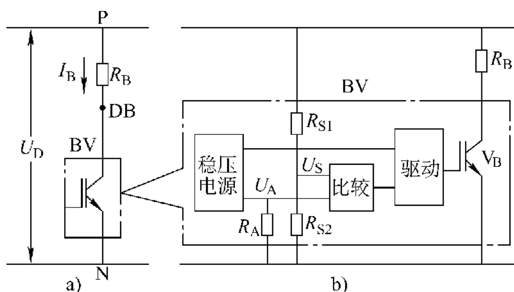


图 3-56　制动单元框图

问题 70　制动单元在运行过程中损坏了，怎样处理才不耽误生产？

1. 基本对策　作为临时的应急措施，制动单元中的开关器件可以用三相交流接触器来代替，如图 3-57 所示。这时，接触器的三对触点必须串联，原因如下：

（1）耐压的考虑　交流接触器触点的额定电压是 500V，而直流电压则大于 500V。串联以后，耐压可达 1500V，具有较大裕量；

（2）灭弧的考虑　直流电路在接通和断开过程中的电弧比交流电路严重得多。将三对触点串联以后，可以起到分割电弧的作用，有利于灭弧。

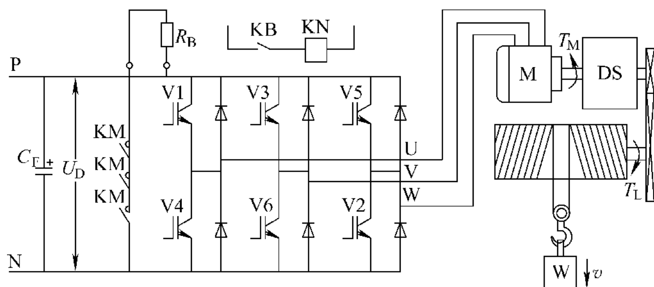


图 3-57　用接触器触点代替制动单元

2. 接触器的选择

（1）主触点的额定电流　考虑到接触器有可能比较频繁地接通和断开，故主触头的额定电流应适当地选大一些，一般说来，可按制动电流的（1.5～2）倍进行选择：

$$I_{KN} \geqslant (1.5 \sim 2) I_B \tag{3-10}$$

式中　I_{KN}——接触器触点的额定电流（A）。

上例中，制动回路的平均电流约为

$$I_B = \frac{650}{20} = 32.5\text{A}$$

由式（3-10）：

$$I_{KN} \geqslant (1.5 \sim 2) \times 32.5 = (48.75 \sim 65)\text{A}$$

选

$$I_{KN} = 60\text{A}$$

（2）接触器的线圈电压　与控制柜中的控制电压相同即可。

3. 接触器的控制方法

（1）起重机械　由控制吊钩下行的接触器的辅助触点或通过中间继电器 KB 来进行控制。使吊钩在每次向下运行时，制动回路就处于放电状态。

（2）频繁起、制动的机械　由停机按钮通过中间继电器 KB 来进行控制。使生产机械在每次停机时，制动回路就处于放电状态。

必须说明，上述方法只能作为应急措施临时使用。如长期使用，则可能造成电能的浪费。

问题 71　22kW 变频器配同功率电动机，起、制动比较频繁，按说明书配 10Ω/5kW 制动电阻，发热严重，怎么处理？

1. 核算

（1）放电电流　直流电压上限按 700V 计，则：

$$I_B = \frac{700}{10} = 70\text{A}$$

（2）制动转矩　电动机的额定电流 $I_{MN} = 42.5\text{A}$，由式（3-5），求出制动转矩为

$$T_B = \frac{2 \times 70}{42.5} T_{MN} = 3.3 T_{MN}$$

可见，制动转矩太大，或者说，制动电阻值选得太小，应增大制

动电阻值。

（3）容量核算　由式（3-7）计算，制动电阻的通电功率为

$$P_{B0}=\frac{700^2}{10}=49000\text{W}=49\text{kW}$$

由式（3-8），制动电阻的容量修正系数为

$$\alpha_B=\frac{5}{49}=0.1$$

对于起、制动比较频繁的负载来说，此 α_B 值太小。或者说，制动电阻的容量太小了。

2. 重选

（1）制动电阻值　实际工作中，应根据负载的惯性大小，和对减速时间的要求来进行选择。这里按一般规律，把起动转矩减小一半，则选

$$R_B=20\Omega$$

（2）制动电阻容量

电阻的通电功率

$$P_{B0}=\frac{700^2}{20}=24500\text{W}=24.5\text{kW}$$

可以按问题 69 中所举例子，用 9 根 2kW 发热元件串、并联来代替，如图 3-55 所示的那样。

问题 72　一开机制动电阻就烫，是什么原因？

1. 基本分析　刚开机时，电动机不可能就减速，直流电路不存在泵升电压，能耗回路不应该通电，制动电阻是不发热的。

制动电阻在一开机时发热，说明能耗电路一开机就导通了。显然，制动单元的工作是不正常的。

2. 可能原因

（1）制动单元内的功率管已经击穿，制动单元已经损坏；

（2）制动单元的控制部分发生故障。

问题 73　变频器对制动电阻和制动单元有哪几种配置？

常见的是三种配置方式：

（1）变频器内部既配置了制动单元，也配置了制动电阻，如图 3-58a 所示。如果制动转矩不足，需要外配制动电阻时，应将内置制

动电阻的电路断开，以免损坏制动单元。

（2）变频器内只配置制动单元，如图 b 所示。在这种情况下，在外配制动电阻时，应注意了解内置制动单元的允许电流。

以上两种方式，主要用在容量较小的变频器中。

（3）容量较大的变频器，一般都需外配制动单元和制动电阻，如图 c 所示。

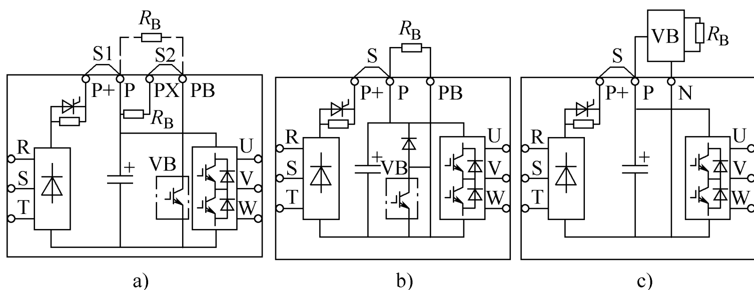


图 3-58　变频器对制动电阻和制动单元的配置

a）内置制动电阻和制动单元　b）内置制动单元　c）全部外置

第 4 章　控制方式及应用

4.1　电动机的带负载能力

问题 1　异步电动机的机械特性说明什么问题？

描绘电动机的转速和转矩之间关系 $n=f(T)$ 的特性曲线，称为电动机的机械特性。

1. 异步电动机机械特性的特点　异步电动机的机械特性曲线如图 4-1a 所示，其特征可通过三个点来描述：

（1）理想空载点　转矩为 0（$T=0$）称为理想空载，这时，电动机的转速为同步转速 n_0，如图中之 N_o 点。

（2）起动点　转速为 0（$n=0$）时称为起动状态（电动机已通电），这时电动机的转矩称为起动转矩 T_S，如图中之 S 点。

（3）临界点　异步电动机的机械特性有一个拐点 K，称为临界点。这时的转速 n_K 称为临界转速；这时的转矩 T_K 称为临界转矩，其大小表示了电动机的过载能力。

电动机实际运行的点称为工作点，如图中之 Q 点。这时，转子的转速为 n_1，所产生的转矩为 T_{M1}。转速 n_1 与同步转速 n_0 之差称为转差：

$$\Delta n = n_0 - n_1 \tag{4-1}$$

式中　Δn——转差（r/min）。

转差的大小实际上也是转子绕组切割磁力线速度的大小。

转差与同步转速之比称为转差率：

$$s = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0 - n_1}{n_0} \tag{4-2}$$

式中　s——转差率。

2. 机械特性说明的问题　如图 4-1b，当转速较高，为 n_1 时，转差 Δn_1 较小，转子绕组的感应电流以及所产生的转矩都较小（假设旋转磁场的磁通大小不变）；反之，当转速较低，为 n_2 时，转差 Δn_2 较大，转子绕组的感应电流以及所产生的转矩也都较大。

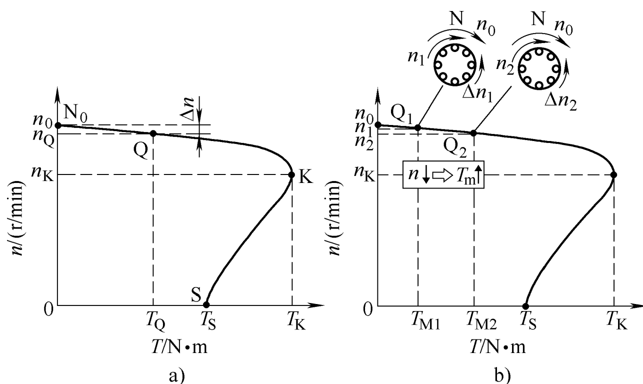


图 4-1　异步电动机的机械特性及其意义

a）异步电动机的机械特性　b）机械特性说明的问题

就是说，在正常情况下，异步电动机是通过增大或减小转速来调整其轴上的转矩的。

问题 2　负载的机械特性说明什么问题？

负载的机械特性是表示负载的阻转矩与转速的关系 $n_L = f(T_L)$ 的。不同负载的机械特性也各不相同，但比较典型的类型有三种：

1. 恒转矩特性　主要特点是：不论转速高低，负载阻转矩的大小基本不变，带式输送机是其典型代表，如图 4-2a 所示。

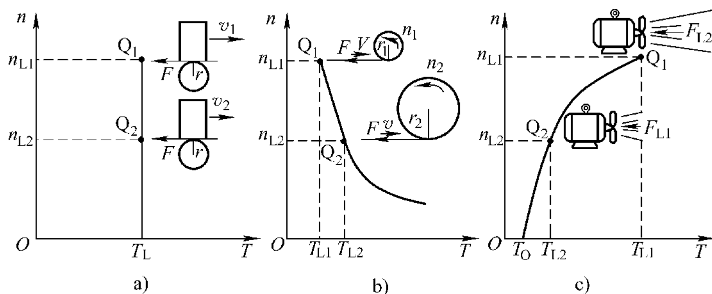


图 4-2　负载的机械特性

a）恒转矩特性　b）恒功率特性　c）二次方律特性

2. 恒功率特性　主要特点是：不论转速高低，负载所需的功率大小基本不变，而转矩和转速成反比，卷绕机械是其典型代表，如图 4-2b 所示。

3. 二次方律特性　负载的阻转矩与转速的二次方成正比，离心式风机、水泵是其典型代表，如图 4-2c 所示。

问题 3　电力拖动系统的运行状态是怎样决定的？

1. 拖动系统的转矩平衡　电动机在带动负载运行时，其转速大小必符合如下规律：

$$T_M > T_L \rightarrow n\uparrow$$

$$T_M < T_L \rightarrow n\downarrow$$

$$T_M = T_L \rightarrow n = \text{const}$$

式中　T_M——电动机的转矩（N·m）；

T_L——负载转矩（包括损耗转矩）（N·m）；

n——系统转速（r/min）。

2. 拖动系统的工作点　拖动系统的运行状态由电动机机械特性和负载机械特性的交点决定，如图 4-3 中之 Q 点。图中，曲线①是电动机的机械特性，曲线②是负载的机械特性，Q 点称为拖动系统的工作点，设 Q 点的转速为 n_Q，则：

（1）转速下降为 n_1　当转速为 n_1 时，电动机的转矩将增加为 T_{M1}，而负载的转矩将减小为 T_{L1}，显然：

$T_{M1} > T_{L1}$，系统必将加速，随着转速的上升，T_M 逐渐减小，而 T_L 逐渐增大，直至到了 Q 点，才能稳定下来，如图 a 所示。

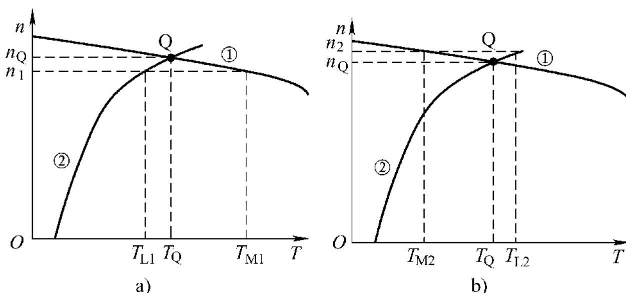


图 4-3　拖动系统的工作点

a）转速低于工作点的情形　b）转速高于工作点的情形

（2）转速上升为 n_2　当转速为 n_2 时，电动机的转矩将减小为 T_{M2}，而负载的转矩将增大为 T_{L2}，显然：

$T_{M2} < T_{L2}$，系统必将减速，随着转速的下降，T_M 逐渐增大，而 T_L 逐渐减小，直至到了 Q 点，才能稳定下来。

所以，拖动系统只能在 Q 点稳定运行。

3. 拖动系统的习惯性分析　如上述，在稳定状态下运行时，电动机的转矩总是和负载转矩相平衡的。所以，习惯上在分析电动机的机械特性时，横坐标常常直接作为负载转矩来看待，如图 4-4 所示，通常的说法是：当负载转矩从 T_{L1} 增加到 T_{L2} 时，系统的转速将从 n_1 下降为 n_2。

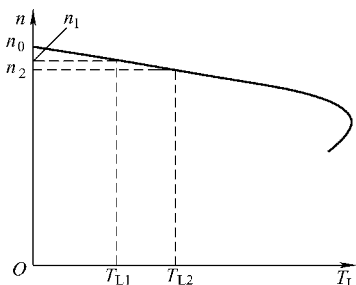


图 4-4　机械特性的习惯分析

问题 4　怎样评价电动机的机械特性？

对于机械特性，通常用“硬度”来进行评价。所谓硬度，是指当负载转矩改变时，转速变化的程度。具体说明如下：

1. 硬特性　如图 4-5a，当负载转矩从 T_{L1} 增加为 T_{L2} 时，系统转速从 n_1 减小为 n_2，但减小的幅度不大，称之为硬特性。

2. 软特性　如图 4-5b，当负载转矩从 T_{L1} 增加为 T_{L2} 时，系统转速从 n_1' 减小为 n_2'，减小的幅度较大，称之为软特性。

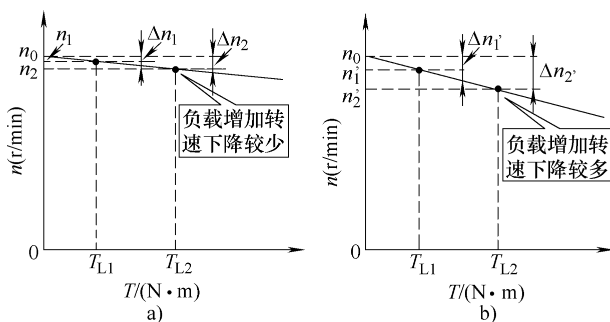


图 4-5　机械特性的评价

a）较硬机械特性　b）较软机械特性

需要说明的是，硬特性和软特性是一个相对概念。一般说来，大多数生产机械希望电动机的机械特性越“硬”越好。

问题 5　影响异步电动机机械特性的参数有哪些？

在不改变频率的情况下，主要有两种情况：

1. 改变电压　当电动机的输入电压减小后，其特点如图 4-6a 所示：

（1）临界转速 n_K 不变；

（2）临界转矩 T_K 将减小为 T'_K。

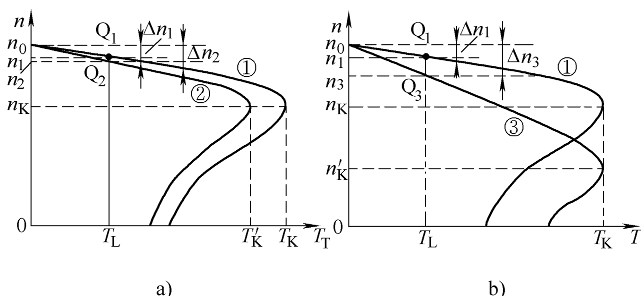


图 4-6　机械特性的改变

a）改变电压的机械特性　b）改变转子电阻的机械特性

2. 改变转子电阻　当电动机的转子电阻增大（主要是绕线转子异步电动机）后，其特点如图 4-6b 所示：

（1）临界转矩 T_K 不变；

（2）临界转速 n_K 将减小为 n'_K。

4.2　变频器的控制方式

问题 6　什么是控制方式？

各种电动机在实现调速时，都必须采取一些辅助手段，以改善电动机的机械特性和调速特性。以直流电动机为例，在调速过程中，必须加入电流反馈环节（内环）和转速反馈环节（外环），才能使它的调速特性趋于完善。

异步电动机的变频调速也不能例外。为了改善其在调速过程中的机械特性和调速特性，也必须采取一些必要的措施。不过，异步电动机在进行变频调速时，可采取的方法较多，比较灵活，可以通过功能预置方便地进行调整。变频器说明书中的所谓控制方式，就是在变频

调速的情况下，改善异步电动机特性的方式。

问题 7　变频器有几种控制方式?

一般说来，主要有以下几种方式：

1. V/F 控制方式　即通过调整变频器输出侧的电压频率比（U/f 比）的方法，来改变电动机在调速过程中机械特性的控制方式。

2. 矢量控制方式　是一种模拟直流电动机调速特点的控制方式，效果较好。根据其有无转速反馈的特点，又分为：

（1）无反馈矢量控制方式　即不需要转速反馈的控制方式；

（2）有反馈矢量控制方式　即需要加入转速反馈环节的控制方式。

3. 直接转矩控制方式　这是部分变频器采取的一种控制方式，可以通过直接控制转矩的大小来调速，其控制结果与矢量控制类似，但各有优缺点。

问题 8　各种控制方式的主要特点和应用范围如何?

见表 4-1。

表 4-1　各种控制方式的主要特点和应用范围

比较项目	V/F 控制	无反馈矢量控制	有反馈矢量控制
调速范围	1:10～1:20	1:20～1:80	1:100 以上
最低运行频率/Hz	3	1(部分 5)	0.1 以下
最高运行频率/Hz	80	100	100
最小加速时间/s	0.2	0.1	数十 ms
额定负载时的转速变化率	3%～5%	0.5%～1%	0.05%～0.5%
适用场合	对特性要求不高 调速范围不大	对特性要求较高 调速范围不大	对特性要求很高 调速范围大

4.3 V/F 控制方式

问题 9 变频的同时为什么还要变压？

1. 异步电动机的能量传递关系

如图 4-7，异步电动机是通过电磁感应来传递能量的，各部分的功率如下述。

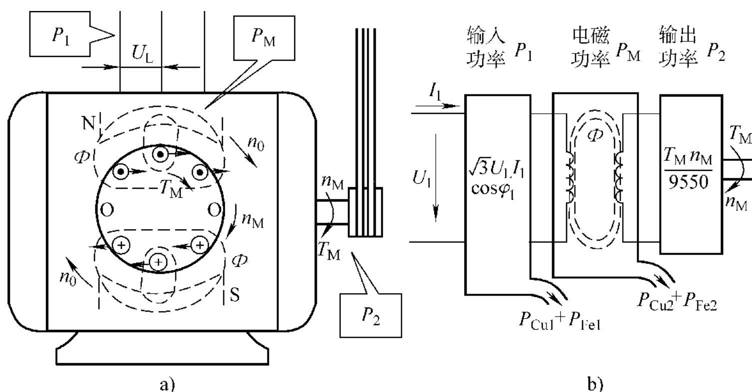


图 4-7 异步电动机的能量传递

a）异步电动机的工作原理 b）能量传递关系

（1）电动机的输入功率 电动机输入的是三相电功率，计算公式如下：

$$P_{1X} = \sqrt{3} U_{LX} I_1 \cos\varphi_1 \times 10^{-3} \tag{4-3}$$

式中 P_{1X}——频率为 f_X 时电动机的输入功率（kW）；

U_{LX}——频率为 f_X 时电动机输入的线电压（V）；

I_1——电动机每相的电流（A）；

$\cos\varphi_1$——电动机定子侧的功率因数。

（2）电动机的输出功率 电动机输出的是机械功率，计算公式如下：

$$P_{MX} = \frac{T_M n_{MX}}{9550} \tag{4-4}$$

式中 P_{MX}——频率为 f_X 时电动机轴上的输出功率（kW）；

T_M——电动机的转矩（与负载转矩相平衡）（N·m）。

（3）电磁功率　从电功率和机械功率之间起传递和转换作用的磁场功率，用 P_M 表示。其大小反映了电动机磁路内磁通 Φ 的大小。

2. 频率下降时各部分功率的变化　假设，电源电压的频率 f_X 人为地调低了，这时，电动机的转速必下降：

$$n_{MX}=\frac{60f_X}{p}(1-s) \tag{4-5}$$

式中　f_X——电动机的工作频率（Hz）；

n_{MX}——频率为 f_X 时的转速（r/min）；

p——磁极对数；

s——转差率。

一方面，由式（4-4），在负载转矩不变的情况下，电动机转速的下降将导致输出功率的下降；另一方面，式（4-3）表明，电动机的输入功率和频率之间，并无直接关系。就是说，当频率下降时，电动机的输入功率并不自动地随着下降。

所以，在频率下降时，将出现输入功率和输出功率之间的严重失衡，使传递能量的电磁功率和磁通大幅增加，电动机的磁路将严重饱和，励磁电流的波形严重畸变，产生峰值很大的尖峰电流。

3. 变频的同时还要变压　为了维持输入功率和输出功率之间的平衡，在频率下降的同时，必须人为地使电压与频率同时下降。这就是在变频的同时还必须变压的原因。

由于电压的下降是人为的，这就有可能根据负载的不同特点来适当地调整 U/f 比。这种通过调整 U/f 比来改变电动机特性的方法，便称为 V/F 控制方式。

问题 10　怎样简单地表示调频与调压的关系？

通常用频率调节比和电压调节比来表示。

1. 频率调节比　变频器的输出频率与额定频率之比称为频率调节比：

$$k_F=\frac{f_X}{f_N} \tag{4-6}$$

式中　k_F——频率调节比；

f_X——变频器的输出频率（Hz）；

f_N——额定频率（Hz）。

2. 电压调节比　变频器的实际输出电压与额定电压之比：

$$k_{U} = \frac{U_{X}}{U_{N}} \tag{4-7}$$

式中　k_{U}——电压调节比；

U_{X}——变频器的实际输出电压（V）；

U_{N}——额定电压（V）。

当 $U/f = \text{const}$ 时，有：

$$k_{U} = k_{F}$$

问题 11　*U/f* 比和电动机的带负载能力是什么关系？

1. U/f 比和磁通大小的关系　如上述，变频的同时还要变压的根本目的，是为了使磁场能量能够协调好输入功率和输出功率之间的平衡关系。由于磁通是联系输入电路和输出电路的唯一纽带，因此，U/f 比的大小是和磁路内磁通的大小密切相关的。简言之，当频率在额定频率以下改变时，有：

$$U/f \uparrow \rightarrow k_{U} > k_{F} \rightarrow \Phi \uparrow \rightarrow P_{1X} \uparrow$$

$$U/f \downarrow \rightarrow k_{U} < k_{F} \rightarrow \Phi \downarrow \rightarrow P_{1X} \downarrow$$

2. U/f 比和带负载能力的关系　异步电动机的电磁转矩是电磁能转换成机械能的具体体现，它是转子绕组中的感应电流与磁通相互作用的结果，计算公式是：

$$T_{M} = K_{T} I_{2} \Phi_{1X} \cos\varphi_{2} \tag{4-8}$$

式中　K_{T}——转矩常数；

I_{2}——转子绕组的电流（A）；

$\cos\varphi_{2}$——转子侧的功率因数。

式（4-4）中，电流 I_{2} 的大小是外部所不能控制的，要想从外部控制电动机的带负载能力，只能通过控制 U/f 比的大小来实现：

$$U/f \uparrow \rightarrow \Phi \uparrow \rightarrow T_{M} \uparrow$$

$$U/f \downarrow \rightarrow \Phi \downarrow \rightarrow T_{M} \downarrow$$

问题 12　电压和频率保持正比关系不行吗？

电压和频率保持正比关系并不能保持电动机的磁通不变。

1. 电动机定子侧的功率损失　功率损耗包括铜损耗和铁损耗，铁损耗所占比例较小，为说明问题方便起见，可忽略不计。铜损耗则和电流大小有关：

$$P_{Cu1} = 3I_1^2 r_1 \times 10^{-2} \tag{4-9}$$

式中　P_{Cu1}——定子的铜损（kW）；

I_1——定子每相电流（A）；

r_1——定子每相绕组的电阻（Ω）。

2. 额定频率时的能量图与磁通　当变频器的输出频率为额定频率时，其输出电压是电动机的额定电压，电动机的输入功率等于额定功率

$$P_{1N} = 3U_{1N}I_1\cos\varphi_1 \times 10^{-3} \tag{4-10}$$

式中　U_{1N}——电动机的额定相电压（V）。

电动机的能量关系如图 4-8a 所示，传递能量的电磁功率为

$$P_M = P_{1N} - P_{Cu1} - P_{Fe1} \tag{4-11}$$

式中　P_M——电动机中，从定子传递到转子的电磁功率（kW）；

P_{1N}——电动机输入的额定功率（kW）；

P_{Fe1}——定子侧的铁损耗（kW）。

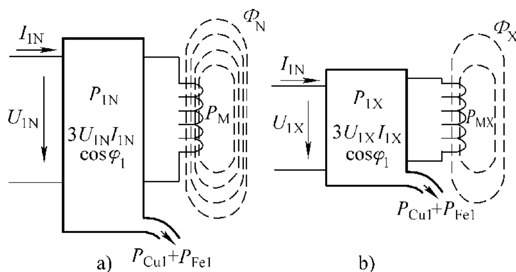


图 4-8　不同频率时的能量关系和磁通

a）额定频率时　b）频率较低时

在额定情况下，电动机磁路内的磁通为额定磁通 Φ_N。电动机的机械特性如图 4-9 中之曲线①所示，临界转矩为 T_{KN}，带负载能力为额定转矩 T_{MN}。

3. 频率下降时的能量图与磁通　当频率下降为 f_X 时，如果相电压随频率成正比地下降至 U_{1X}。这时，电动机的输入功率减小为

$$P_{1X} = 3U_{1X}I_1\cos\varphi_1$$

但如果负载的阻转矩不变，则电动机的定子电流也基本不变，由式（4-9）知，定子侧的铜损也不变。结果，铜损耗在输入功率中所

占的比例必然增大，而电磁功率 P_{MX} 所占的比例必然减小，磁路中的磁通 Φ_X 也必减小，如图 4-8b 所示。

由式（4-8），电动机的电磁转矩将减小，从而带负载能力也减小，其机械特性如图 4-9 中之曲线②所示：临界转矩减小为 T_{KX}，带负载能力减小为有效转矩 T_{MEX}。

所以，在电压和频率保持正比关系（$k_U = k_F$）的情况下，频率下降时，电动机的带负载能力是有所下降的。

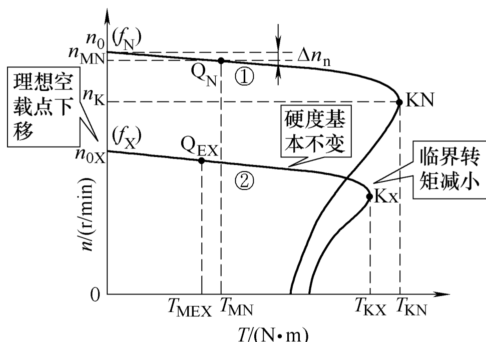


图 4-9　频率下降时的带负载能力

问题 13　为什么变频器要设置许多 *U/f* 线供用户选择？

1. 不同负载的低速特性　不同的负载在低速运行时的阻转矩大小是很不一样的，举例如下：

（1）恒转矩负载特点　不论转速高低，负载的阻转矩都不变。例如带式输送机，要求低频时电动机的转矩等于额定转矩，如图 4-10a 所示。这就要求电动机在低频运行时，也能产生较大的转矩，*U/f* 比应该大一些，如图 4-11 中之 B 点所示：当频率为 f_{X1} 时，把电压提升到 U_{X2}。

（2）分段负载　有些负载满载运行时虽然阻转矩较大，但满载时的调速范围不大。例如离心浇铸机，必须具有一定转速时，才能把铁水（或钢水）灌入，进行浇铸，负载的阻转矩较大。但重载时的调速范围不大，由于低速时没有铁水（或钢水），处于轻载运行状态，如图 4-10b 所示。电动机在低频运行时，并不需要产生太大的转矩，*U/f* 比也可以小一些，如图 4-11 中之 A 点所示：当频率为 f_{X1} 时，

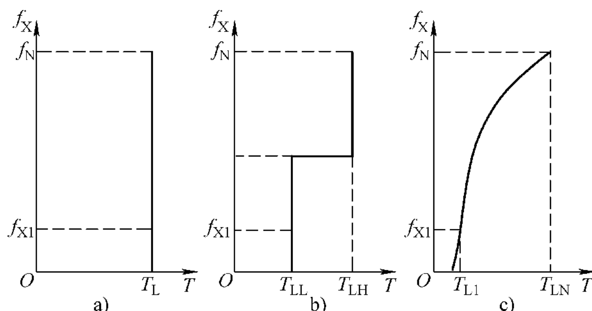


图 4-10　不同负载的低速特性

a）恒转矩特性　b）低速轻载　c）二次方律特性

把电压降为 U_{X1} 就够了。

（3）二次方律负载　以离心式风机为例，负载的机械特性如图 4-10c 所示，低速运行时，负载的阻转矩很小。电动机在低频运行时，所需转矩很小，U/f 比也应该更小一些，如图 4-11 中之 C 点所示：当频率为 f_{X1} 时，应把电压降为 U_{X3}。

2. 变频器为用户提供的 U/f 线　上述例子说明，不同的负载在低频运行时对 U/f 比的要求也是不一样的。为此，各种变频器都设置了许多种 U/f 线，供用户根据负载的具体要求来进行预置。在诸多 U/f 线中，图 4-11 和图 4-12 中的曲线①是电压与频率成正比地变化的 U/f 线，称为基本 U/f 线。其特点是：

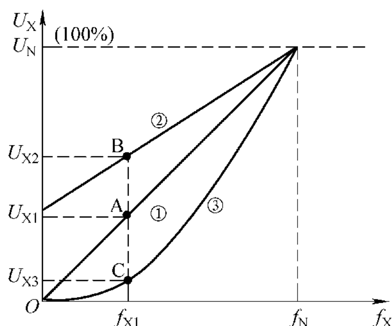


图 4-11　不同负载的 U/f 比

$$\frac{U_X}{f_X} = \text{const}(k_U = k_F)$$

如要加大低频时的带负载能力，须在基本 U/f 线的基础上加大 U/f 比，使 $k_U > k_F$，称为转矩补偿或转矩提升。各种变频器都设置了许多条补偿程度不同的 U/f 线，供用户选择。但不同变频器提供的方式不尽相同，大致有以下几种：

（1）全频补偿型　变频器所提供的多条 U/f 线，全部是从 0Hz 一直补偿到额定频率 f_N 的，如图 4-12 中之“1”号线至“20”号线。

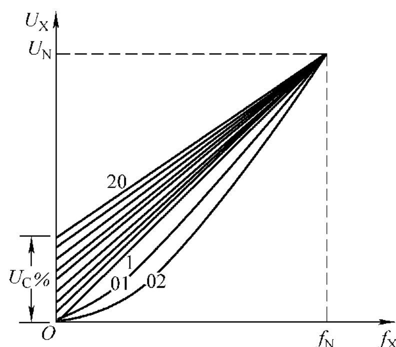


图 4-12　直线型 U/f 线

对于如离心式风机一类的二次方律负载，则专门提供了两条负补偿（$k_U < k_F$）的“低减 U/f 线”，如图中之 01 号曲线和 02 号曲线。

预置时，根据负载的具体情况按编号大小进行选择。

（2）部分补偿型　考虑到在较高频率时，一般不需要补偿。所以，部分变频器提供的 U/f 线可以只补偿低频段，如图 4-13a 所示。在进行选择时，须预置以下数据：

1）起点补偿量　以补偿量的百分数 $U_C\%$ 表示；

2）转折频率 f_t　即转折点所在位置的频率。

（3）坐标预置型　用户可直接预置各转折点的坐标，如图 4-13b 所示。

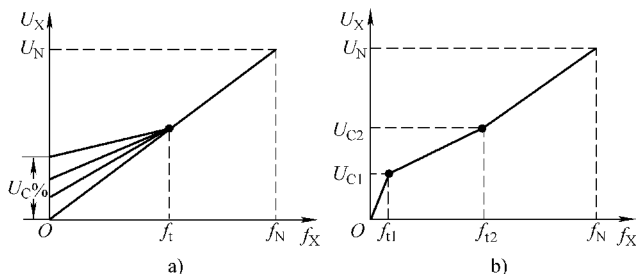


图 4-13　部分补偿型和坐标预置型 U/f 线

a）部分补偿型　b）坐标预置型

问题 14　转矩提升量的上限值以多大为宜？

从正常运行的角度看，转矩提升量的上限值 $U_{CH}\%$ 应该是 10%（$U_{CH}\% = 10\%$），也就是 38V。一般说来，这也就是当电动机的负荷

率 $\xi_{max}=100\%$ 时应选的提升量。当 $\xi_{max}<100\%$ 时，提升量也大致可以按比例减小。

不少变频器实际允许的转矩提升量的上限值可达 15%、20%、30%等，但这并不等于说，在满负荷时应该选这么大。例如，三菱变频器的说明书上，明明写着："转矩提升量设定过大，将导致电动机过热，基本原则是提升量的最大值大约为 10%。"然而，说明书上提供的设定范围却是 0～30%。

问题 15　怎样决定转矩提升量？

首先，要测定负载的最大负荷率，粗略地测定负荷率的方法很简单，只要在工频运行时，测定电动机的最大运行电流，则最大负荷率计算如下：

$$\xi_{max}=\frac{T_{Lmax}}{T_{MN}}\approx\frac{I_{1max}}{I_{MN}} \tag{4-12}$$

式中　ξ_{max}——负载运行中的最大负荷率；

T_{Lmax}——负载运行中的最大转矩（N·m）；

I_{1max}——负载运行中的最大电流（A）。

如上述，当 $\xi_{max}=100\%$ 时，转矩提升量应该是 $U_{CH}\%=10\%$，则当 $\xi_{max}<100\%$ 时，转矩提升量应该是

$$U_C\%=U_{CH}\%\xi_{max}=0.1\xi_{max} \tag{4-13}$$

式（4-13）只是作为初选的依据，在实际工作中，还应该根据具体情况进行调整。

问题 16　自动转矩提升有什么特点？

绝大多数变频器都具有自动转矩提升功能。但不少变频器说明书上都说，用了自动转矩提升后，对于某些负载，在某些频率段可能出现振荡。从而影响了它的使用。

手动提升时，只要预置了提升量 U_C，在不同频率时需要补偿的电压也就决定了，在图 4-14a 中，只要预置了 $U_C=10\%U_N$(38V)，则变频器很快就算好了在不同频率时的补偿量，如 10Hz 时的补偿电压为 24V，25Hz 时的补偿电压为 15V。

而在自动转矩提升时，变频器在运行期间，始终处于自动搜索的状态。当发现转矩不足时，增加一个 δU（如 5V）试试看，如仍不足，则再增加一个 δU，如图 b 那样。不论频率多大，每次搜索的电

压增量都是相同的，所以，自动转矩提升时的 U/f 线是许多的平行线。因为变频器始终处于自动搜索的状态，所以容易引起振荡。

不过，自动转矩提升可以提高电动机的起动转矩。所以，对于一些需要重载起动的负载，采用自动转矩提升还是有好处的。

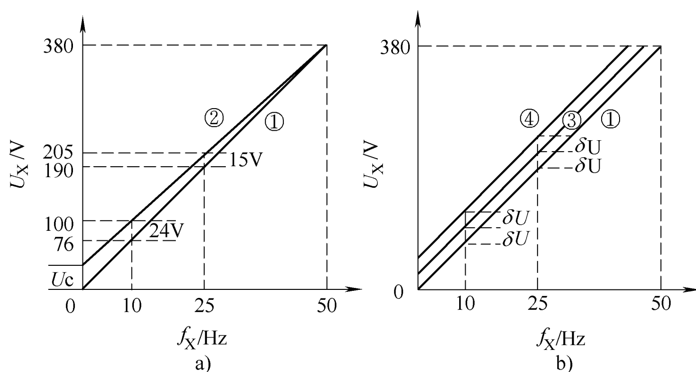


图 4-14 自动转矩提升的 U/f 线

a）手动 U/f 线的提升 b）自动 U/f 线的搜索过程

问题 17 U/f 比大一些不好吗？

有人说，低频运行时负载对 U/f 比的要求难以准确掌握，U/f 比小了有可能带不动负载。所以，在预置 U/f 比时，应该遵循“宁大勿小”原则。

这是有失偏颇的。因为，U/f 比过大，磁通也必增大，使电动机的磁路进入饱和段，结果是导致励磁电流的波形严重畸变，产生很大的尖峰波，如图 4-15 所示。

电动机的磁通与励磁电流间的关系，遵循磁化曲线的规律，如图 a 和图 b 中的曲线①所示。

正常情况下，电动机的磁路工作在不饱和区，如图 a 中之 A 点，当磁通的峰值为 Φ_1 时，由于不饱和时，磁路的导磁率较高，故励磁电流的振幅较小，如图 a 中之曲线②所示。

如果因为 U/f 比增大而使磁通峰值增大至 Φ_2 时，虽然与 Φ_1 相比，增加得不多，但由于磁路饱和的原因，励磁电流的波形严重畸

变，峰值剧增，如图 b 中之曲线③所示。这样大的电流峰值，有可能使变频器因过电流而跳闸。

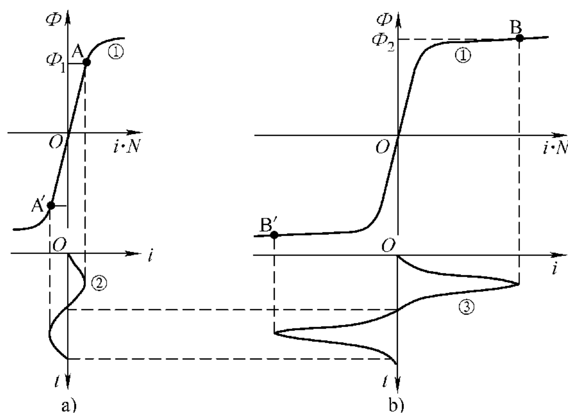


图 4-15　磁路饱和对励磁电流的影响

a）磁路未饱和　b）磁路饱和

问题 18　什么是低励磁压频比？

离心式风机等二次方律负载在低频运行时，负载的阻转矩与额定转矩相比，减小很多，如图 4-16a 所示。非但不必要加大 U/f 比，还应该减小 U/f 比，使 $k_U < k_F$，进行负补偿，如图 4-16b 中之曲线②所示（曲线①是基本 U/f 线）。在许多变频器的说明书中，称之为“低减压频比”。

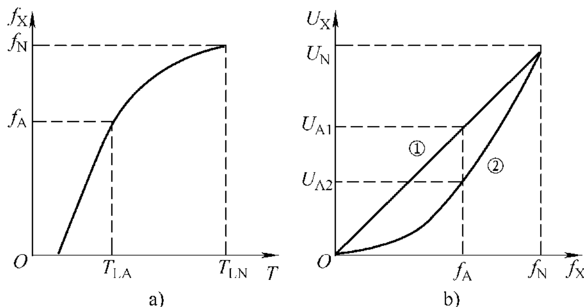


图 4-16　低减压频比的工作特点

a）二次方律负载　b）低减 U/f 线

例如，当运行频率为 f_A 时，不补偿（基本 U/f 线）时的电压为 U_{A1}。如选用了低减 U/f 线（曲线②），则电压将下降为 U_{A2}。

选用了低减压频比，可进一步提高风机、水泵等二次方律负载的节能效果。

问题 19　有没有补偿得正好的 U/f 线?

理论推导出的满足恒转矩特点的 U/f 线如图 4-17a 中的曲线②所示（曲线①是 $k_U = k_F$ 时的 U/f 线）。U/f 比符合曲线②时，所得到的电动机的机械特性和有效转矩线如图 b 所示，故曲线②称为完全补偿线。

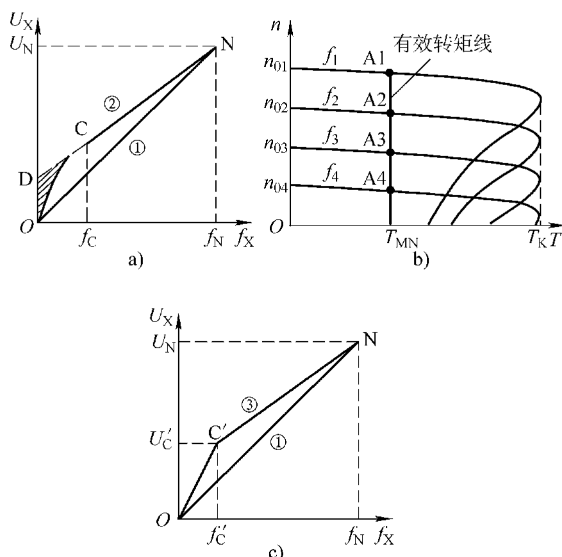


图 4-17　补偿得正好的情形

a）补偿得正好的 U/f 线　b）补偿结果

c）变频器的模拟补偿功能

要得到曲线②是十分困难的，实际工作中也没有这样的必要。有的变频器用模拟折线来代替，如图 c 中之曲线③所示，效果较好。折线上转折点 C′的位置（f'_C，U'_C）可由用户根据负载的具体要求来进行预置。

4.4　V/F 控制方式的派生功能

问题 20　什么是转差补偿?

1. 转差补偿的目的　当负载从轻载（$T_L = T_{L1}$）增大到重载（$T_L = T_{L2}$）的过程中，使电动机的转速基本不变，得到较硬的机械特性。

2. 转差补偿的方法　当负载增加，转速下降时，通过适当提高变频器的输出频率，使电动机降低了的转速得到补偿。

例如，当负载转矩为 T_{L1} 时，通过预置“转差补偿”，适当提高变频器的输出频率，使电动机的同步转速从 n_0 上升至 n_{01}，而拖动系统的工作点则从 Q_1 上升至 Q_1'。使拖动系统的转速与原来给定的同步转速 n_0 基本相等。如负载转矩又增加为 T_{L2}，通过“转差补偿”，变频器的输出频率又提高一些，使电动机的同步转速上升至 n_{02}，而拖动系统的工作点则从 Q_2 上升至 Q_2'，拖动系统的转速仍与同步转速 n_0 基本相等。

由于用户的给定频率并未改变，因此，宏观地从转速给定的角度看，电动机的机械特性变“硬”了，如图 4-18b 中之曲线⑩所示。

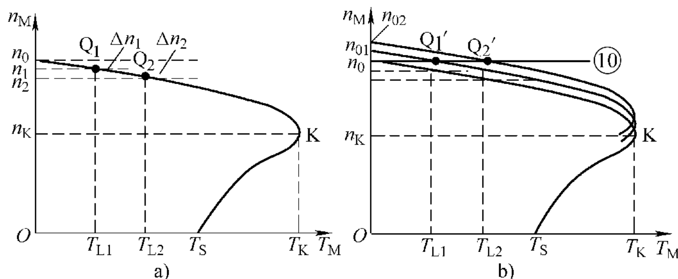


图 4-18　转差补偿原理

a）未补偿　b）补偿后

问题 21　为什么风机在变频 50Hz 时的风量比工频运行时小? 能否加大?

1. 风量略小的原因　由于风机、水泵用变频器对机械特性的要求不高，有的变频器对于逆变桥在交替导通过程中的死区往往不进行

补偿；也有的变频器所选用的逆变管档次较低，其开关时间略长，逆变过程中的死区较大。故变频器在 50Hz 时的实际输出电压常常低于工频电压，所以，电动机的转速略低。

2. 提高风量的措施　一般来说，如果真要在 50Hz 下运行，不如直接切换至工频运行，可省去变频器的损失。

如希望在变频运行时，把转速提高到和工频运行相同，可以预置转差补偿功能。

问题 22　什么是下垂功能？

1. 生产机械的需要　有的生产机械，需要有 2 台或 2 台以上的电动机同时拖动。例如，桥式起重机的“大车”，通常在两侧各设一台容量相同的电动机，该两台电动机由同一台变频器供电，使它们同时升速和降速，如图 4-19a 所示。在这种情况下，非但要求两台电动机的转速同步，而且要求它们的负荷分配尽量均衡。

但是，由于生产工艺方面的原因，即使是同型号、同容量的两台电动机，它们的机械特性也不可能完全一致。因此，在相同转速下，它们的电磁转矩的大小是不相等的，从而，两台电动机的负荷分配也是不均衡的，如图 4-19b 所示。

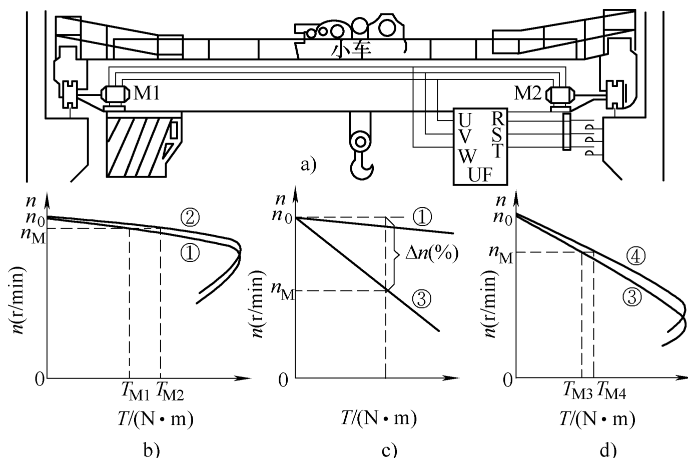


图 4-19　下垂特性及其作用

a）大车拖动系统　b）自然特性时的负荷分配

c）下垂特性的预置　d）下垂后的负荷分配

为了解决上述问题，变频器设置了下垂功能。

2. 下垂功能的预置　所谓下垂功能，实际上就是加大转差的功能。就是说，用户可以根据需要任意预置电动机的转差大小，如图 4-19c 所示。

3. 下垂功能的作用

（1）自动调整负荷分配　假设两台电动机在某一转速 n_M 下运行，比较图 b 和图 d 可以看出：具有下垂特性时，两台电动机的负荷分配的差异较小；

（2）自动调整转速　当两台电动机的转速不一致时，转速偏高者，负荷必偏重，下垂特性将使其转速迅速下降；反之，转速偏低者，负荷必偏轻，下垂特性将使其转速迅速上升。结果是使两台电动机的转速趋于一致。

问题 23　负载增大时常出现堵转，如何解决？

可以考虑的方法有：

1. 预置转差补偿功能　一般情况下，预置了转差补偿功能后，电动机的带负载能力有所增强。

2. 采用矢量控制方式　如变频器有矢量控制功能，则采用矢量控制方式后，电动机的带负载能力也能有所增强。如果调速范围不大，可采用无反馈矢量控制方式。

3. 加大传动比　如果有可能改变传动比的话，则适当加大传动比是较好的选择。

4.5　V/F 控制的应用

问题 24　V/F 控制时，“负载越大、电流也越大”的规律不成立吗？

如果 U/f 比预置得不恰当的话，则上述规律不一定成立。说明如下：

假设电动机以较低频率 f_X 带动某变动负载，由于负载的最大转矩接近于电动机的额定转矩（$T_L \approx T_{MN}$），故 U/f 比预置得较大。在负载最重的情况下，电动机的定子电流不超过额定值。

然而，当负载转矩较轻时，电动机定子电流的变化规律和工频运行时有着明显的差异，说明如下：

1. 空载时的电动机电流　简单地说，空载时，即使不进行补偿（$U/f = \mathrm{const}$），电动机也能带得动。因此，被提升了的 U/f 比将使电动机处于“过补偿”的状态。

其结果，将引起磁路的深度饱和、励磁电流 I_0 的波形发生严重畸变，峰值很大。在定子电流 I_1 中，I_0 居主导地位。I_1 的有效值因 I_0 的增大而增大，达到接近或超过额定电流 I_N 的程度，甚至有可能因过电流而跳闸，如图 4-20 中之曲线②中之 A 点所示。

2. 负载增大时电流的变化　负载转矩增大时，电动机的转速将有所下降，转差增大，转子电流 I_2 也增大。其去磁作用使磁通 Φ_1 减小，铁心的饱和程度逐渐减轻，励磁电流的尖峰值迅速减小，故而 I_1 反而下降，如图 4-20 中曲线②所示的 Q 点以前的情形。

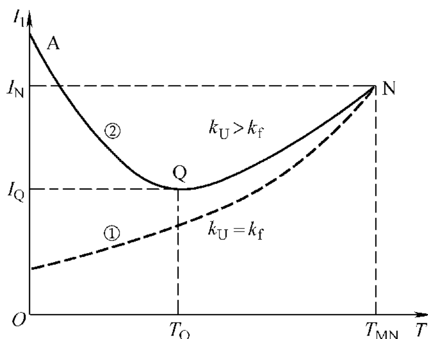


图 4-20　V/F 控制时的电流—转矩曲线

3. 负载较重时电流的变化　当负载转矩继续增大时，转子电流 I_2 增大到足以使铁心脱离饱和状态，励磁电流 I_0 的波形及其有效值将趋向于恢复正常。这以后，随着负载和转子电流 I_2 的增大，定子电流 I_1 也随之增大。如图 4-20 中曲线②Q 点以后的情形。

图 4-20 所示的曲线②，是在频率较低、负载较重时的比较极端的情形。在大多数情况下的电流转矩曲线介于曲线②或曲线①之间（曲线①是额定频率时的情形）。

问题 25　变频器有时在轻载时出现过电流保护，原因是什么？

在大多数情况下，U/f 线一经设定之后是不能变化的。通常，是以重载时也能带得动负载作为设定 U/f 线的依据。显然，重载时电流 I_1 和铜损耗 $I_1^2 r_1$ 都较大，需要的补偿量（即 U/f 比）也大。但这样一来，在负载较轻，I_1 和 $I_1^2 r_1$ 都较小时，必将引起“补偿过分”，导致磁路饱和，并使励磁电流的波形发生畸变。就是说，在 U/f 线已经设定的情况下，负载变化时，磁路的饱和程度将随之变化，其结果是：

如果在低频轻载时，磁通大小等于额定值的话，重载时，由于 I_1 和 $I_1^2r_1$ 都增大，磁通减小，电动机有可能带不动负载；

反之，如果在低频重载时，磁通大小等于额定值的话，轻载时，由于 I_1 和 $I_1^2r_1$ 都减小，磁通增大，电动机励磁电流的波形发生畸变，有可能在励磁电流出现尖峰时因“过电流”而进行保护。

问题 26　某离心浇铸机，电动机功率为 110kW，选用日立 SJ300 系列变频器。开始起动时能转起来，但升速到 5Hz 时就跳闸。什么原因？怎样解决？

1. 机械的工况

（1）浇铸机空载起动，起动到所要求的转速后，浇入铁水；

（2）浇入铁水后负载很重，但所要求的调速范围不大，约为 $(80\sim100)\%\,n_N$。

故生产机械的机械特性如图 4-21a 中的曲线①所示。

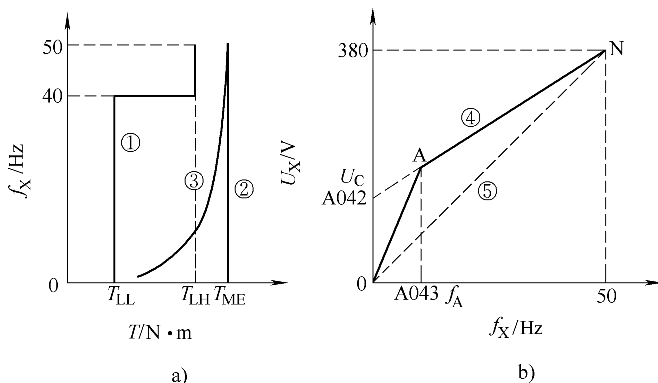


图 4-21　U/f 比的预置与结果

a）机械特性　b）修改前后的 U/f 线

2. 日立 SJ300 系列变频器 U/f 线的特点　如图 4-21b 所示，为折线型：

（1）刚起动时，U/f 比从 0 开始逐渐增大，上升较快；

（2）到达转折点（图中之 A 点）后，U/f 比上升变缓，但不再改变。相应的功能码及用户预置情况是：

功能码 A042—预置补偿程度，用户考虑到加入铁水后负荷很重，故数据码预置为上限值 20%；

功能码 A043—预置转折点位置，用户预置为 10%。

用户预置的 U/f 线如图 b 中之曲线④所示。

3. 基本分析

（1）负载的机械特性　未浇入铁水时，电动机能起动起来，说明负荷不重；

浇入铁水后，负荷加重，但调速范围不大，是 40～50Hz。

所以，负载的机械特性如图 a 中的曲线①所示。

（2）用户的预置结果　曲线④与完全补偿线十分接近，可以得到恒转矩的有效转矩线，如图 a 中之曲线②所示。由图知，在未浇入铁水前，电动机的有效转矩比负载转矩大很多，处于补偿过分的状态，这时的跳闸，是由于磁路严重饱和而引起的。

4. 处理方法和结果

（1）总的考虑　事实上，在 40Hz 以上，是没有必要进行转矩补偿的。所以，取曲线⑤所示的基本 U/f 线就可以了。

（2）具体方法　将功能码 A042 和 A043 中的数据码都调到“0”即可，所得到的有效转矩线如图 a 中之曲线③所示。

问题 27　U/f 比对起动过程有何影响？延长起动时间能否减小 U/f 比？

1. 起动过程与动态转矩的关系　在第 3 章中曾经说明，加速过程中电流的大小，和电动机转子的转速能否跟得上频率的上升有关。那么，转子的转速能否跟得上频率的上升又和哪些因素有关呢？主要是两个：

（1）负载惯性的大小　即 GD^2 的大小，这在第 3 章中已经介绍过了。

（2）动态转矩的大小　所谓动态转矩，就是电动机的转矩和负载转矩之差：

$$T_J = T_M - T_L \tag{4-14}$$

式中　T_J——动态转矩（N · m）。

显然，T_J 越大，拖动系统的转速越容易跟上频率的上升。

2. U/f 比与动态转矩的关系

（1）*U/f* 比的大小与机械特性的硬度　在频率相同的情况下，*U/f* 比大，相当于电压较高，机械特性较硬；反之，*U/f* 比小，相当于电压较低，机械特性较软。

（2）*U/f* 比与加速过程中的动态转矩（图 4-22）　图 a 是 *U/f* 比较小时的情形，由于机械特性较软，故动态转矩较小；

图 b 是 *U/f* 比较大时的情形，由于机械特性较硬，故动态转矩较大。

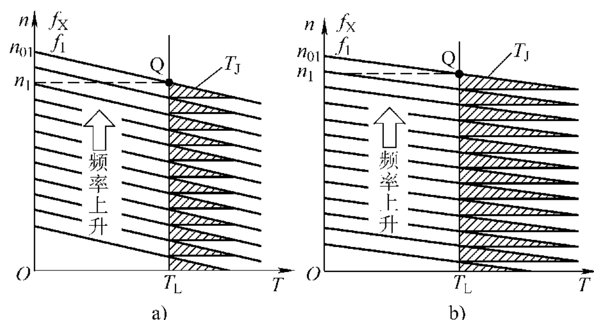


图 4-22　加速过程中的动态转矩与 *U/f* 比

a）*U/f* 比较小　b）*U/f* 比较大

3. 加速时间长短与 *U/f* 比的关系

（1）实际工作中，*U/f* 比主要应根据负载在最低工作频率时阻转矩的大小来进行预置，而不是根据起动时间来预置的。

（2）在电动机转矩足够带得动负载的前提下，起动时间长一些，在起动过程中所需要的动态转矩可以小一些，从这个意义上讲，*U/f* 比是可以减小一些的。

反之，如果由于负载要求快速起动，但系统转速跟不上频率的上升时，可以考虑适当增大 *U/f* 比。

（3）*U/f* 比太大，在起动瞬间容易产生较大的冲击转矩，有可能导致机械的振动。

问题 28　变频器在 50Hz 运行时，进线电流常常比工频运行时大，何故？

原因可能有两个方面：

1. 变频器本身有功耗　如果变频器在 50Hz 运行和工频 50Hz 运

行时的转速完全一样，则电动机的输出功率相同。但变频器本身有一定的功耗，故变频器的输入功率必大于工频运行时的功率，因为电源电压相同，故变频运行时输入电流略大一些。

2. 变频运行时的转速略高　如果变频器预置了转差补偿功能，或采用了后面提到的矢量控制功能，则变频运行时的机械特性变硬了。变频 50Hz 运行时电动机的实际转速可能高于工频 50Hz 时的转速，则变频运行时电动机轴上的输出功率增大了。根据能量守恒的原理，变频器的输入功率也必增大，进线电流也同时增大。

问题 29　有一台变频器，原来用在带式输送机上，后改用到风机上，起动时，频率刚上升到 10Hz 左右，就因过电流而跳闸，是什么原因？

原因可能有两个方面：

1. 因磁路饱和而过电流　因为带式输送机是恒转矩负载，采用变频调速时，为了在低频时也能带动负载，其转矩提升功能（U/f 比）必须预置得较大。而风机是二次方律负载，低速运行时，负载的阻转矩很小。所以，在低频（如 10Hz）时，电动机的磁路将高度饱和，励磁电流严重畸变，导致因过电流而跳闸。

2. 因加速过快而过电流　因为带式输送机的惯性相对较小，故加速时间一般在 10s 以内。而风机的惯性较大，所需加速时间常常在 20s 以上。所以，在加速过程中，容易因过电流而跳闸。

4.6　基本频率的调整

问题 30　为什么说在一般情况下不宜调整基本频率？

因为基本频率是和变频器的最大输出电压对应的频率，而在大多数情况下，变频器的最大输出电压是和输入电压相等的。就是说，电动机在基本频率下运行，实际上也就是运行在额定状态，磁路内的磁通是额定磁通，所产生的电磁转矩也是额定转矩。

如果改变了基本频率，电动机的磁通和电磁转矩也都将发生变化，这在大多数情况下是不希望的。

问题 31　有一台进口电动机，额定数据：420V，60Hz。在 380V 的情况下，怎样预置基本频率？

该电动机的基本 U/f 比是：

$$\frac{U_N}{f_N}=\frac{420}{60}=7$$

就是说，当 $U/f=7$ 时，电动机的磁通等于额定磁通。则当电源电压为 380V 时，能够满足 $U/f=7$ 的频率是：

$$f_{BA}=\frac{380}{7}=54\text{Hz}$$

所以，应该把基本频率预置为 54Hz，电动机就能够和它原设计的额定状态相同了。

问题 32　某郊区的工厂，网络电压偏低，通常只有 350V 左右，电动机带负载时电流偏大，能用变频器吗？

我国低压电动机的额定电压是 380V，额定频率是 50Hz。所以，基本 U/f 比是：

$$U_N/f_N=380/50=7.6$$

在 350V 的情况下，满足基本 U/f 比等于 7.6 的基本频率应该是：

$$f'_{BA}=350/7.6=46\text{Hz}$$

就是说，把基本频率预置为 46Hz，电动机的磁通就可以达到额定磁通了。但需要注意以下几点：

第一，当把基本频率预置为 46Hz 后，在 46Hz 以下运行时，电动机的有效转矩将等于额定转矩，但如果运行在 50Hz 时，电动机的电磁转矩仍将小于额定转矩。

第二，要注意各台电动机的负荷率。事实上，许多机器由于设计时留的裕量较大，50Hz 时常并不真正运行在额定状态下。从节能的观点看，当电动机的负荷率较低时，只要电动机的工作电流不超过其额定电流，降压运行是有利于节能的，没有必要担心。

问题 33　有一台机器，电动机数据：$P_{MN}=280$kW，$I_{MN}=506$A，配用 315kW 的变频器。常在 40Hz 的频率下运行，但电动机的运行电流达 540A，发热严重，调整转矩提升不起作用，怎么办？

这台电动机在额定磁通的情况下运行时，电磁转矩已经不能再增大了。因为变频器在运行频率较高，接近额定频率时，靠转矩提升功能是难以加大 U/f 比的，如图 4-23a 所示。而要想再增大一点电动机的电磁转矩，应考虑在允许范围内再加大一点磁通量。

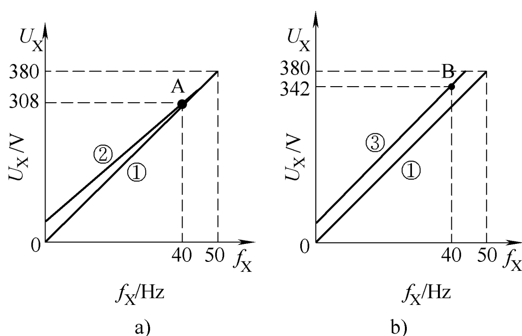


图 4-23　高频区加大转矩

a）加大转矩提升　b）减小基本频率

具体方法是，把基本频率略为减小一点，使 U/f 线如图 b 中的曲线③所示，则可以使 40Hz 时的电压增加到 340V 左右，则电动机的磁通量可以比额定磁通增大约 10%。

经过试验，当把基本频率降低到 45Hz 时，电动机的电流就降到了额定电流以内了。

但必须注意，基本频率是不能减小得太多的，否则将导致电动机磁路的饱和。按国家规定，电压的允许上限值为 110% U_N，则磁通的允许上限值大体上也可以定为 110% Φ_{1N}。而基本频率的下限值应以不低于 45Hz 为宜。

问题 34　三相 220V 的电动机怎样配用变频器？

这可能有多种情况，分别说明如下：

1. 电动机的绕组为 Δ 形连接　如果电动机绕组是 Δ 形连接的，则只需将绕组改接成 Y 形连接就可以了。

这是因为，当电动机的额定电压为 220V，而绕组接成 Δ 形时，其每相绕组的额定电压为 220V，如图 4-24a 所示。

当把电动机绕组改接成 Y 形时，它所能够承受的线电压为 380V，故可以接到 380V 的电源上去，如图 4-24b 所示。

2. 电动机的绕组为 Y 形连接　当电动机的绕组为 Y 形连接时，说明其每相绕组的额定电压只有：

$$\frac{220}{\sqrt{3}}=127\text{V}$$

在这种情况下，当变频器的额定电压为 380V 时，可通过适当预置变频器的基本 *U/f* 比，使变频器在输出频率为 50Hz 时，对应的输出电压为 220V，如图 4-25b 所示。

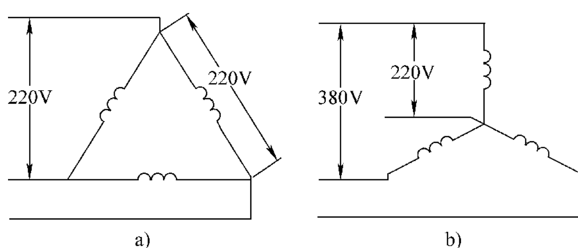


图 4-24　改变电动机绕组的接法

a）Δ 形联接　b）Y 形联接

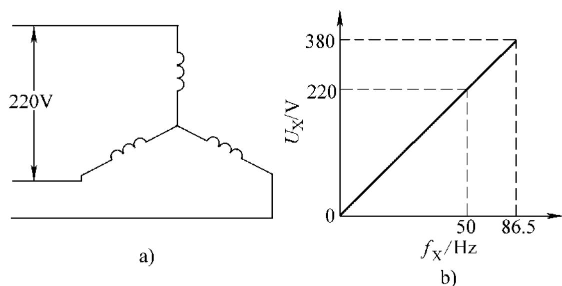


图 4-25　电动机绕组为 Y 形联接

a）绕组接法　b）基本 *U/f* 比的预置

具体的预置方法是：将变频器的基本频率（即与 380V 对应的频率）预置为：

$$50\times\sqrt{3}=86.5\text{Hz}$$

则当变频器的输出频率为 50Hz 时，其输出的平均电压为 220V。

但在这种情况下，必须注意电动机的绝缘问题。这是因为：

虽然施加于电动机的平均线电压是 220V，但实际上，因为变频

器的输入线电压是 380V（相电压是 220V），所以，电压脉冲的幅值仍然是三相桥式整流后的平均值：

$$220 \times 2.34 = 515\text{V}$$

因此，如果电动机是按照相电压为 127V 设计的话，其绝缘强度是不够的。

3. 利用“单进三出”变频器　所谓“单进三出”变频器，就是变频器的输入侧接单相电源（在我国，通常是 220V），而输出侧是三相交流电压，如图 4-26a 所示。

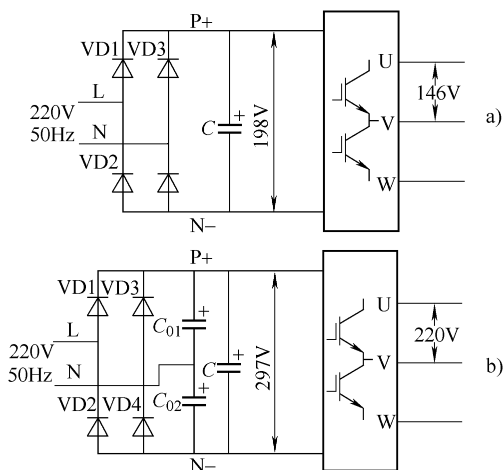


图 4-26　单进三出变频器的主电路

a）无升压电路　b）加入升压电路

但单相 220V 交流电压经桥式整流后的直流电压平均值 U_{D1} 只有交流电压有效值的 0.9 倍：

$$U_{D1} = 0.9 \times 220 = 198\text{V}$$

逆变成三相交流后的线电压大小：

$$U_L = \frac{198}{1.35} = 146\text{V}$$

即只有电动机额定电压的 66.4%。而异步电动机的电磁转矩是和电压的平方成正比的，当电压为额定电压的 66.4% 时，其带负载

能力只有额定转矩的 44%。因此，当电动机的负荷率较大时，可能带不动负载。

为了能增加三相 220V 电动机的带负载能力，实际的“单进三出”变频器中，在单相全波整流以后，增加了一个升压电路，如图 4-26b 所示。

图中，升压电路由电容器 C_{01} 和 C_{02} 构成。

当 N 点的电位处于正弦波的上半周时，直流回路 P_+ 端的正电位将因 C_{01} 的作用而得到补充；而当 N 点的电位处于正弦波下半周时，直流回路 N_- 端的负电位也因 C_{02} 的作用而得到补充，从而增大了 P_+ 和 N_- 之间的直流电压 U_{D2}。

适当选择 C_{01} 和 C_{02} 的电容量，可使直流回路的平均电压 U_{D2} 升至 297V，使逆变后的三相线电压升为 220V。

问题 35　电动机的额定电压为 380V，能否配用 220V“单进三出”的变频器？

本问题的实质是：如何把额定电压为 380V 的电动机应用到最大线电压为 220V 的变频电源上去。

1. 定子绕组为 Y 形连接　如果电动机的定子绕组是 Y 形接法，当它接至线电压为 380V 的电源时，每相绕组所得到的相电压为 220V，如图 4-27a 所示。就是说，每相绕组的额定电压实际上是 220V 的。

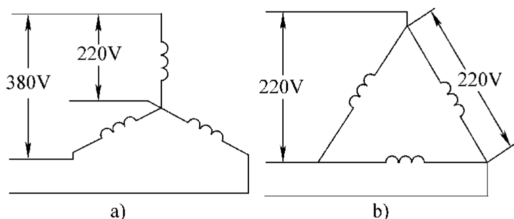


图 4-27　绕组的接法与线电压

a）Y 形接法　b）Δ 形接法

因此，只要把定子绕组改接成 Δ 形，如图 4-27b 所示，则接到线电压为 220V 的三相电源中时，每相绕组也能得到 220V。

2. 定子绕组为 Δ 形连接　为了保持在 220V 时，电动机的压频比

与额定状态相同，应把基本频率按比例降低至 30Hz，如图 4-28a 中之曲线①所示。这样，在 900r/min（30Hz）以下电动机的转矩能够达到额定转矩；900r/min（30Hz）以上是恒功率区，到额定转速时，电动机的有效转矩约为额定转矩的 60%，如图 4-28b 中之曲线③所示。

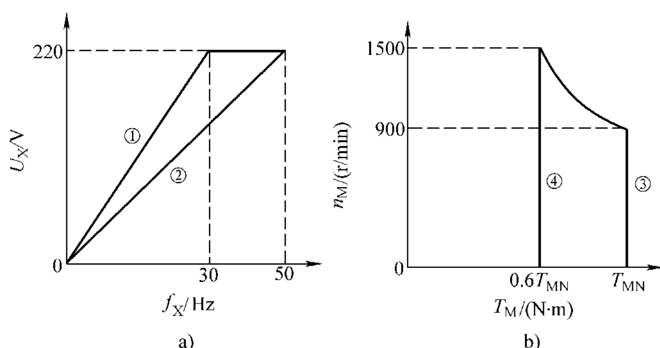


图 4-28　380V 电动机与 220V 变频器相配

a）基频预置　b）有效转矩

必须注意，由于电动机的发热取决于电流，所以，额定电流是不允许增大的。现在，输入电压只有额定电压的约 60%，故电动机的有效功率也只有额定功率的约 60%。

如果简单地把额定电压预置为 220V，基本频率仍为 50Hz，如图 4-28a 中之曲线②所示，则电动机的压频比及磁通都将降低为额定状态的约 60%，从而电动机在额定转速以下，有效转矩都只有额定转矩的 60%，如图 4-28b 中之曲线④所示。

问题 36　电动机的额定频率是 50/60Hz，把基本频率预置为 50Hz 和预置为 60Hz 有什么区别？

1. 基本频率预置为 50Hz　与 380V 对应的频率是 50Hz，其基本 U/f 线如图 4-29a 所示，基本 U/f 比：

$$\frac{U_N}{f_{BA}}=\frac{380}{50}=7.6$$

2. 基本频率预置为 60Hz　与 380V 对应的频率是 60Hz，其基本

U/f 线如图 4-29b 所示，基本 U/f 比：

$$\frac{U_N}{f_{BA}}=\frac{380}{60}=6.3$$

与 50Hz 对应的电压只有 316V，如图 4-29b 所示。

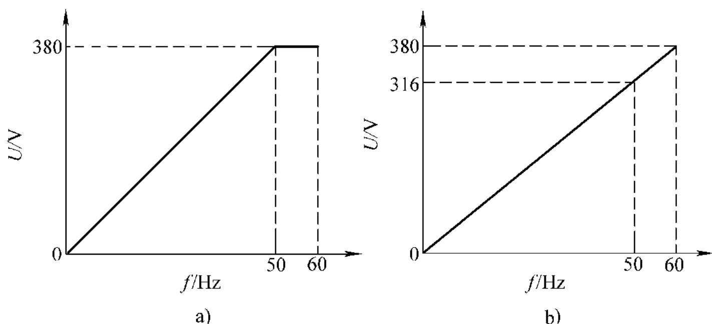


图 4-29　基本频率预置为 50Hz 与 60Hz 的区别

3. 比较

（1）在 50Hz 以下　如不进行转矩补偿，则 $f_{BA}=50$Hz 时的有效转矩较大。如 $f_{BA}=60$Hz，则通过转矩补偿，有效转矩也可以达到和 $f_{BA}=50$Hz 时接近的程度。

（2）在 60Hz 及以上　两种情况的有效转矩线基本相同。

问题 37　额定频率为 60Hz 的电动机用到 50Hz 的电源上时，空载电流偏高，是什么原因？

电动机的额定频率为 60Hz，额定电压为 380V 时，其额定的 U/f：

$$\frac{U}{f}=\frac{380}{60}=6.33$$

当接到 50Hz 的电源上时，电动机的 U/f：

$$\frac{U}{f}=\frac{380}{50}=7.6$$

可见，其 U/f 与额定情况相比，大了许多，有可能导致电动机磁路的轻度饱和，所以，空载电流偏高，但并不影响使用。

问题38　有一台电动机的额定电压是360V，额定频率是67Hz，配用380V的变频器时，怎样处理？

1. 方法1

（1）作出电动机要求的基本 U/f 线　根据电动机的额定数据，当变频器的输出频率为67Hz时，对应的输出电压应为360V，故基本 U/f 线的终点为（67，360），如图4-30中之A点，则OA即为电动机要求的基本 U/f 线。

（2）求出与380V对应的频率　延长OA至B点，使之与380V相对应，按比例算出B点对应的频率是70.7Hz≈71Hz。

因为变频器的额定电压是380V，所以，应将基本频率预置为71Hz。

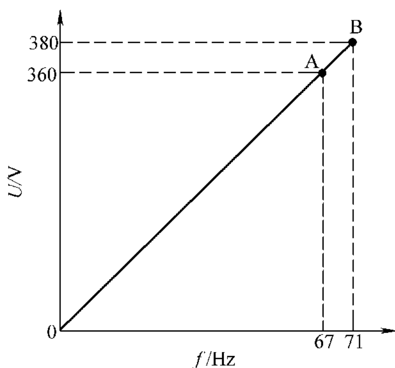


图4-30　特殊基频的预置

2. 方法2　以康沃CVF—G2为例，预置功能如下：

（1）功能码b—5（电动机额定电压）预置为360V；

（2）功能码b—6（电动机额定频率）预置为67Hz。

4.7　矢量控制

问题39　什么是矢量控制？

矢量控制的基本思想是：仿照直流电动机的调速特点，使异步电动机的转速也能通过控制两个互相垂直的直流磁场来进行调节，其框图如图4-31所示。

1. 对给定信号的处理　将频率给定信号分解成在空中旋转的两个互相垂直的直流磁场信号，分别称为磁场分量 i_M^* 和转矩分量 i_T^*；以模拟直流电动机的主磁场和电枢磁场。

2. 进行等效变换　通过一系列的等效变换，将互相垂直的直流旋转磁场信号等效地变换成三相旋转磁场的控制信号 i_A^*、i_B^*、i_C^*，用来控制逆变桥的工作。

当频率给定信号改变时，仿照直流电动机的情形，使直流磁场中

的励磁分量保持不变，而转矩分量得到调整，以模拟直流电动机的主磁场不变，只调节电枢磁场的情形，从而获得和直流电动机相彷的调速特性。

在图 4-31 中，转速反馈的作用，是使电动机的转速严格地和给定转速保持一致，因此，电动机的机械特性是很硬的，并且具有很高的动态响应能力。

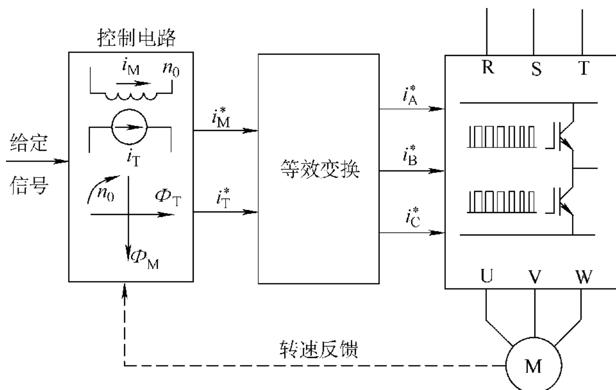


图 4-31　矢量控制框图

问题 40　无反馈矢量控制与有反馈矢量控制有什么区别?

所谓无反馈矢量控制，仅仅指用户不需要在变频器外部另装转速反馈装置，而并不是说，变频器内部也是开环的。

由于转速反馈需要在变频器外部附加测速装置，比较麻烦。进一步的研究表明，在了解电动机参数的前提下，即使只检测电动机的端电压和电流，也能算出转子磁通及其角速度，并进而推算出转矩电流指令 i_T^* 和励磁电流 i_M^* 指令，实现矢量控制。

由于无反馈矢量控制不需要外接转速反馈，对于用户来说，方便了许多。但和有反馈矢量控制相比，多少存在着差异，主要如下：

1. 机械特性　在改善电动机的机械特性方面，无反馈矢量控制已能得到较“硬”的机械特性。但因为没有转速的检测，所以转速的控制精度稍差。

2. 低频特性　不少变频器在低频运行的稳定性（≤5Hz）较差，

不同品牌变频器的差异较大，须注意了解和选购。在一般情况下，无反馈矢量控制适用于转速调节范围不太大的场合。

3. 动态响应性能　无反馈矢量控制实质上是通过对其他物理量（电流、磁通、功率因数等）的检测和计算而间接地使转速得到补偿的。因为计算需要时间，所以，无反馈矢量控制方式在动态响应方面的性能较差。

问题 41　什么是自动检测？怎样进行？

矢量控制方式在进行等效变换时，须根据电动机的参数作大量的运算。而所需数据中的相当部分，例如，定子绕组的电阻和漏磁电抗、转子绕组的电阻和漏磁电抗的折算值等，一般用户是很难得到的，这给矢量控制的应用带来了困难。对此，当代的许多变频器都已经配置了自动检测电动机参数的功能。

各种变频器进行自动检测的方法不尽相同，举例如下：

1. 艾默生 TD3000 系列变频器　功能码 F1.09 用于选择自动检测功能，数据码是：

“0”—禁止自动检测；

“1”—允许自动检测。

功能码 F1.10 用于实施自动检测，数据码是：

“0”—不进行自动检测；

“1”—进行自动检测，步骤如下：

（1）将电动机的铭牌数据预置给变频器（功能码 F1.00 ~ F1.05）；

（2）将功能码 F1.10 预置为“1”；

（3）按变频器键盘上的 RUN 键，变频器将执行自动检测。

检测完毕后，自动转为“0”。

“2”—变频器设置了一个自动检测的操作程序（说明书中称为“调谐宏”）。当功能码 F1.10 预置为“2”时，该操作程序开始运行，并在显示屏上指导用户进行必要的功能预置和操作。检测完毕后，自动转为“0”。

2. 富士 G11S 系列变频器　功能码 P04 预置“自整定”功能，数据码是：

“0”—不进行自动检测；

“1”—在停机状态下，自动检测电动机的绕组电阻及漏磁电抗；

“2”—首先在停机状态下，自动检测电动机的绕组电阻及漏磁电抗；然后使电动机与负载脱离并空转，自动检测电动机的空载电流。

自动检测的步骤如下：

（1）预置好以下功能：最高频率（R03）、基本频率（F04）、额定电压（F05）、最高电压（F06）；

（2）将电动机的铭牌数据预置给变频器，如额定容量（P02）、额定电流（P03）、空载电流（P06，当功能码 P04 预置为“2”时，空载电流可不必预置）；

（3）自动检测空载电流时，须将电动机与负载脱开，并使其加速至 0.5f_{BA}（基本频率的一半）处空转运行（注意安全）；

（4）当功能码 P04 预置为“1”以及预置为“2”后，按键盘上的 FWD 键或 REV 键，即开始自动检测，显示屏将显示“执行中”。

自动检测的时间约为数秒到数十秒，与所预置的加速时间和减速时间有关。

（5）当显示屏所显示的“执行中”消失时，表示自动检测已经结束，按 STOP 键，终止自动检测。

问题 42　怎样使用旋转编码器？

有反馈矢量控制的转速信号大多由编码器测得，编码器按安装方法分为轴型和轴套型两种。轴套型可直接套在电动机轴上，是比较理想的一种方法，但普通电动机因受到轴的长度的限制而难以采用。故有矢量控制型变频器专用电动机，其特点之一，便是输出轴能和轴套型编码器相配。

1. 编码器的信号与接线

变频器常用编码器为两相（A 相和 B 相）原点输出型，其输出信号分为 A 相和 B 相。两者在相位上互差 90°±45°，如图 4-32b 所示，$\overline{A}$和$\overline{B}$分别是 A 相和 B 相的“非”。每旋转一转，编码器输出的脉冲数可根据情况选择。例如，TRD—J 系列编码器的脉冲数从 10p/r～1000p/r 分 16 挡可选。

Z 相为原点标记，其特点是：每转一转，只输出 1 个相位固定的脉冲，作为原点的标志。

图 4-32a 所示是编码器的引出线。

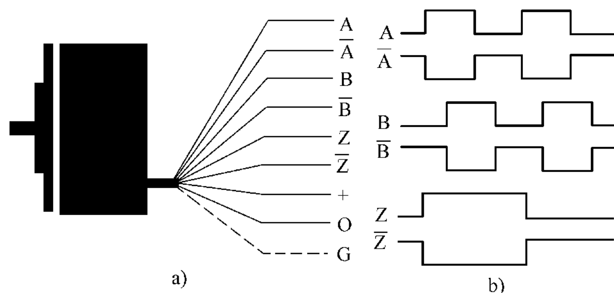


图 4-32　编码器的信号与接线

a）编码器的引出线　b）编码器的输出信号

2. 编码器与变频器的连接主要有两种类型：

（1）直接连接　如图 4-33a 所示；

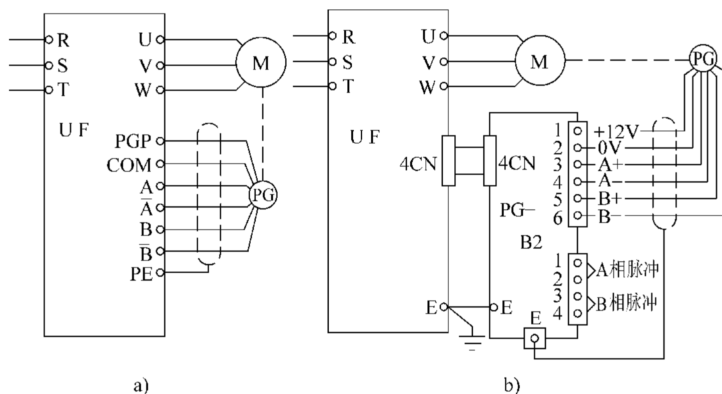


图 4-33　编码器与变频器的连接

a）直接连接　b）通过控制卡连接

（2）通过控制卡连接

以安川 CIMR—G7 系列变频器为例，须配置专用的 PG 速度控制卡，如图 4-33b 中的 PG—B2。将控制卡插入变频器的相关插座中，再将 PG 的引出线接至控制卡上。

问题 43　普通电动机怎样安装旋转编码器?

普通电动机的输出轴较短，在安装了带轮后，已经没有位置再安装旋转编码器了。在这种情况下，通常可把旋转编码器安装在电动机的后部。

1. 轴套型旋转编码器的安装　在电动机的后端盖上开一个孔，并在后部的轴上安装一个轴径与编码器匹配的过渡轴，如图 4-34a 中的灰色部分所示。编码器的固定部分可通过一个 S 形薄钢片固定在电动机的后端盖上，如图中的黑色部分所示。

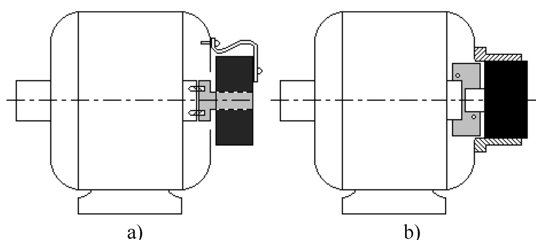


图 4-34　编码器的安装

a）加装过渡轴　b）轴型编码器的安装

这种方法也适用于电动机的轴径与轴套型编码器的孔径不相匹配时的安装。但这种方法对两轴相对时的同心度要求较高，加工起来比较费事。

2. 轴型编码器的安装　安装轴型编码器时，可加装一个连接器。连接器的两边分别和电动机的轴和编码器的轴相接，如图 b 中的灰色部分所示。两边的轴径可以相同，也可以不相同。编码器的固定部分可通过安装支架固定在电动机的端盖上，如图中的黑色部分所示。

因为连接器两侧的孔径都是按电动机轴和编码器轴的标准设计的，所以，安装起来比较方便。

问题 44　哪些情况不能应用矢量控制方式?

因为矢量控制方式需要根据电动机的参数进行一系列的变换运算，故凡是有可能影响计算精度的场合，都不宜使用。如：

1. 配用电动机容量　应与变频器的要求相符，最多相差一个挡次。例如，一台容量为 110kVA 的变频器，应该配用容量为 75kW 的电动机。如配用 55kW 的电动机，还在允许范围内。但如配用 37kW

的电动机，则因为电动机的参数与 75kW 电动机的参数相差较大，不宜采用。

2. 磁极对数　变频器在设计时，是按 4 极电动机的参数进行设计的。因此，电动机的磁极对数也只能与 4 极相差一个档次。就是说，2 极和 6 极电动机还可以，8 极以上就不宜采用了。

3. 电动机台数　只能是一台变频器控制一台电动机。如控制两台以上时，则因两台并联后的参数与一台电动机的参数相差很大，故不能使用。

4. 变频器与电动机之间不宜接输出接触器如果接触器在运行过程中断开，则变频器的反馈信息消失，变频器将视为故障状态。

问题 45　应用矢量控制方式时，显示屏显示的频率很不稳定，是什么原因?

因为矢量控制实际上是一种闭环控制，它随时对反馈信息与给定值进行比较，并根据比较结果随时调整变频器的输出频率与电压。所以，当变频器的显示屏显示输出频率时，其显示的数值就是不断地跳动的。

所以，在一般情况下，变频器的显示屏以显示给定频率为宜。

问题 46　采用了矢量控制后，在 0Hz 时也能产生转矩吗?

可以的，在电动机起动之前，称为预励磁功能；在电动机停止后，称为零伺服功能，说明如下：

1. 预励磁功能　在“有转速反馈矢量控制”方式下，当变频器的运行信号已经有效，但频率给定信号为 0Hz 时，变频器向电动机提供足够的励磁电流，以产生足够大的零速转矩。与 V/F 控制方式的起动前直流制动功能相比，预励磁功能具有更强的零速转矩。

2. 零伺服功能　变频器在运行指令有效的情况下，如频率给定信号为 0，则变频器将使电动机具有足够强的零速转矩。在起重机械中，它能防止重物要在空中停住时的“溜钩”。

问题 47　怎样选择控制方式?

对于控制方式，要根据生产机械的具体要求来进行选择。

1. 二次方律负载　对于离心式风机、水泵和空气压缩机一类的二次方律负载，一般以采用 V/F 控制方式为宜。因为 V/F 控制方式有低励磁 U/f 线，在低频运行时可以更好地节能。矢量控制方式实质

上是使电动机始终保持额定磁通的控制方式，不可能实现低励磁。

2. 恒转矩负载

（1）对于负载率经常变动、调速范围又不很大的负载，一般以选择无反馈矢量控制为好，因为 V/F 控制方式的“转矩提升量”不易预置得恰到好处，但采用无反馈矢量控制方式时，须注意：

1）必须进行电动机参数的自测定。

2）如最低工作频率在 5Hz 以下时，需要了解所选的变频器品牌的低频运行特性。部分变频器在无反馈矢量控制方式下低频运行时，常不够稳定。

（2）对于负载率稳定不变的负载，可采用 V/F 控制方式，因为可以选用价格较低廉的没有矢量控制功能的通用型变频器。

（3）起重机械应采用“有反馈矢量控制”方式，部分变频器也可以采用“无反馈矢量控制”方式。

3. 恒功率负载

（1）卷绕机械可以采用 V/F 控制方式或“无反馈矢量控制”方式。

（2）金属切削机床因为对动态响应要求较高，最好采用“有反馈矢量控制”方式。

问题 48　某系统：$T_L=686\text{N}\cdot\text{m}$，$n_L=(1\sim4)\text{r/min}$，传动比：$\lambda=200$。原选 JD02-22-8/4 变极电动机，$n_{MN}=680/1360\text{r/min}$，0.45/0.75kW。打算改用不变极电动机配合变频调速，问电动机选 4 极还是选 8 极？

1. 分析　负载折算到电动机轴上的转矩：

$$T_L'=T_L/\lambda=686/200=3.43\text{N}\cdot\text{m}$$

电动机上限转速：

$$n_{MH}=\lambda n_{LH}=200\times4=800\text{r/min}$$

电动机下限转速：

$$n_{ML}=\lambda n_{LL}=200\times1=200\text{r/min}$$

（1）选用 $2p=4$

电动机额定转矩：

$$T_{MN(4)}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times0.75}{1360}=5.26\text{N}\cdot\text{m}$$

上限工作频率：

$$f_H = f_N \frac{n_{MH}}{n_{MN}} = 50 \times \frac{800}{1360} = 29.4\text{Hz}$$

下限工作频率：

$$F_L = f_N \frac{n_{ML}}{n_{MN}} = 50 \times \frac{200}{1360} = 7.35\text{Hz}$$

（2） 选用 $2p = 8$

电动机额定转矩：

$$T_{MN(8)} = \frac{9550 P_{MN}}{n_{MN}} = \frac{9550 \times 0.45}{680} = 6.32\text{N} \cdot \text{m}$$

上限工作频率：

$$f_H = f_N \frac{n_{MH}}{n_{MN}} = 50 \times \frac{800}{680} = 58.82\text{Hz}$$

电动机在上限频率时的有效转矩：

$$T_{ME} = T_{MN} \frac{f_N}{f_H} = 6.32 \times \frac{50}{58.82} = 5.37\text{N} \cdot \text{m}$$

下限工作频率：

$$f_L = f_N \frac{n_{ML}}{n_{MN}} = 50 \times \frac{200}{680} = 14.7\text{Hz}$$

2. 结论　根据以上分析，两种转速都可以采用变频调速。但就工作频率的范围而言，$2p = 8$ 时更有利于采用无反馈矢量控制方式。

问题 49　矢量控制时为什么在未接电动机前会“出错”？

在采用了矢量控制方式的情况下，电动机的运行情况必须根据实测数据不断地进行修正。如变频器未接电动机，则测出的数据无法进行运算，变频器只能认为发生了故障。

问题 50　什么是四象限运行？

所谓四象限运行，是指电动机的工作点可能出现在坐标系的四个象限中。电动机在不同象限中的工作状态是不一样的，如图 4-35 所示。

1. 第Ⅰ象限　是电动机的正向拖动状态，这时：电动机的转矩、转速和功率都是“＋”值，凡是正向稳定运行的状态都在第Ⅰ象限。

2. 第Ⅱ象限　电动机的转速是正方向的，但电磁转矩却是“－”

的，说明是制动转矩。所以，电动机处于正向制动状态。因为制动状态是要把电动机在较高转速时的动能消耗掉，所以，功率为“－”值。

3. 第Ⅲ象限　是电动机的反向拖动状态，这时：电动机的转矩、转速和功率都是“－”值，拖动系统在反转运行时，其工作点在第Ⅲ象限。

4. 第Ⅳ象限　是反向制动状态。这时：电动机正在反转，转速是“－”的，但电磁转矩却是“＋”的，故功率为“－”值。

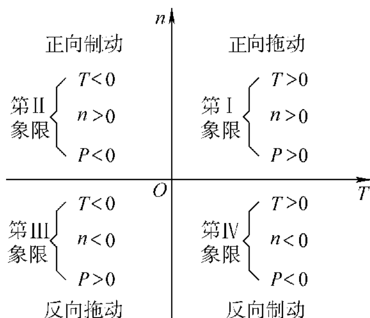


图 4-35　电动机在四个象限中的状态

问题 51　电动机的哪些工作状态出现在第Ⅱ象限？

在变频调速运行系统中，第Ⅱ象限主要在以下两种场合出现：

1. 频率下降时　如第三章 3.5 节所述，当频率下降时，电动机将处于再生制动状态。从机械特性上看，如图 4-36 所示。

设变频器的输出频率为 f_1，电动机的机械特性如曲线①，拖动系统的工作点为 Q_1 点，转速为 n_1；

现将频率下降为 f_2，电动机的机械特性如曲线②。当频率刚下降的瞬间，拖动系统的转速由于惯性的原因，不能立即下降，工作点将跳变至第Ⅱ象限中的 Q' 点，电动机处于再生状态，所产生的电磁转矩为制动转矩 T'_Q，在 T'_Q 的作用下，拖动系统的工作点迅速地沿着曲线②下降，直至 Q_2 点，重又稳定运行。

所以，拖动系统的工作点是在频率下降的过渡过程中出现在第Ⅱ象限的。

2. 直流制动　当电动机处于直流制动状态时，其机械特性如曲线④所示。

假设变频器的输出频率为 f_3，电动机的机械特性如曲线③，拖动系统的工作点为 Q_3 点，转速为 n_3；转为直流制动，在刚进行直流制动的瞬间，拖动系统的转速由于惯性的原因，不能立即下降，工作点将跳变至 Q'' 点，电动机进入直流制动状态，所产生的电磁转矩为制

动转矩 T'，在 T'的作用下，拖动系统的工作点迅速地沿着曲线④下降，直至转速为 0。

所以，当电动机处于直流制动状态时，整个制动过程都在第Ⅱ象限，如图 4-36b 所示。

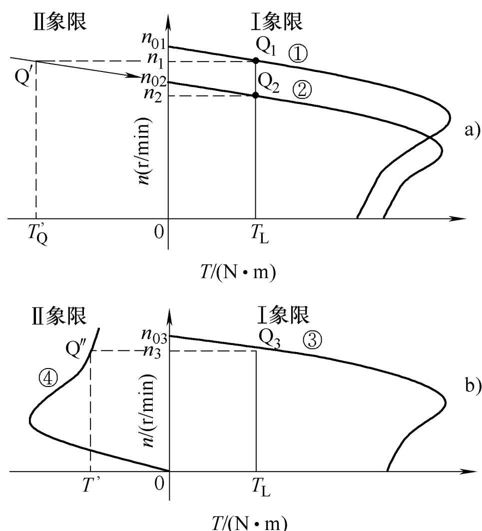


图 4-36　出现在第Ⅱ象限的工况

a）频率下降　b）直流制动

问题 52　电动机的哪些工作状态出现在第Ⅲ象限?

如果说，当电动机工作在第Ⅰ象限时，拖动系统处于正转状态。当拖动系统处于反转状态时，电动机的工作状态出现在第Ⅲ象限，如图 4-37 所示。

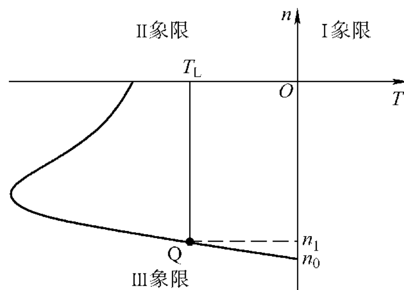


图 4-37　出现在第Ⅲ象限的工况

问题 53　电动机的哪些工作状态出现在第Ⅳ象限？

在变频调速运行系统中，出现在第Ⅳ象限的两种工作状态：

1. 反转而频率下降时　与正转时类似，当反转频率下降时，电动机也处于再生制动状态。从机械特性上看，如图 4-38a 所示。

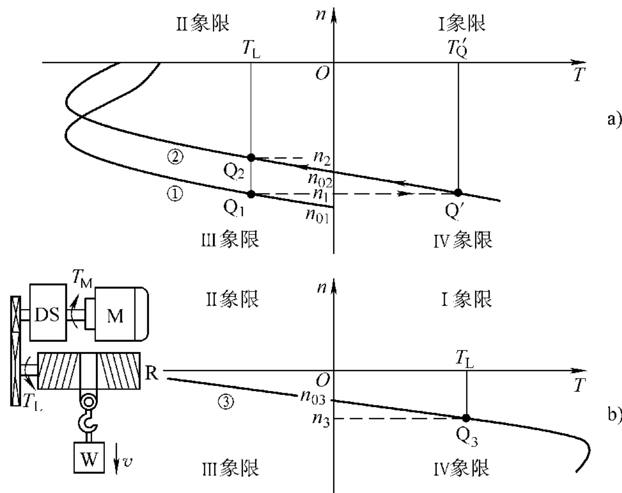


图 4-38　出现在第Ⅳ象限的工况

a）反转频率下降　b）重物下降

设变频器的输出频率为 f_1，电动机处于反转状态，机械特性如曲线①，拖动系统的工作点为 Q_1 点，转速为 n_1；

现将频率下降为 f_2，电动机的机械特性如曲线②。当频率刚下降的瞬间，拖动系统的转速由于惯性的原因，不能立即下降，工作点将跳变至 Q′点，电动机处于再生状态，所产生的电磁转矩为正方向的制动转矩 T'_Q，在 T'_Q 的作用下，拖动系统的工作点迅速地沿着曲线②下降，直至 Q_2 点，重又稳定运行。

所以，拖动系统的工作点是电动机反转时，在频率下降的过渡过程中出现在第Ⅳ象限的。

2. 重物下降　起重机械的吊钩如果上升时作为正转，则下降时为反转。由于重物具有重力加速度，在重力加速度的作用下，电动机的转速将超过同步转速 n_{03}，使电动机的工作状态进入第 4 象限，如

图 4-38b 所示。这时，电动机也处于再生制动状态，所产生的转矩为“+”转矩，是阻止重物下降的。事实上，在这种情况下，电动机的作用是防止重物不断地加速，使重物以一个稳定的速度下降。

4.8　矢量控制方式的派生功能

问题 54　转矩控制和转速控制有什么区别？

变频调速在绝大多数情况下，都是通过调节频率来调节电动机转速的，称为转速控制。

近年来，不少变频器增添了“转矩控制”功能，使变频调速系统在某些领域应用时，其拖动性能有了进一步提高。

转矩控制是一种特殊的控制方式，当变频器的给定信号 U_G 改变时，受调节的不是频率，而是电动机轴上电磁转矩 T_M，如图 4-39 所示：

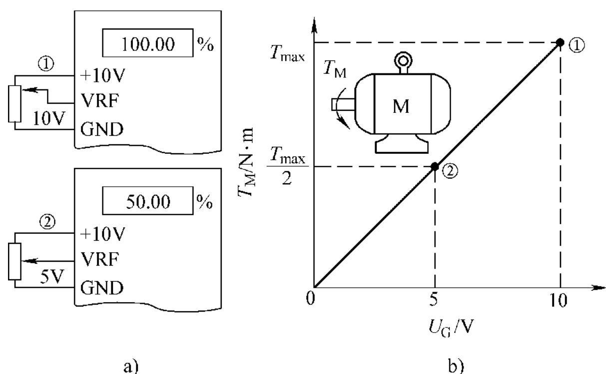


图 4-39　转矩控制的含义
a）转矩控制的给定与显示　b）转矩给定线

当给定信号为 10V 时，电动机的电磁转矩为额定值（100% T_{MN}）如图中之状态①；当给定信号为 5V 时，电动机的电磁转矩为 50% T_{MN}，如图中之状态②。

转矩控制只有在“有转速反馈的矢量控制”方式下才能进行。因此，是矢量控制方式中的一种特殊控制功能。

问题 55　转矩控制的工作特点是什么?

1. 拖动系统的状态　拖动系统的状态取决于系统的动态转矩 T_J:

$$T_J = T_M - T_L \quad (4\text{-}15)$$

式中　T_J——动态转矩（N·m）;

T_M——电动机的转矩(N·m）;

T_L——负载转矩（N·m）。

这里所说的状态，是指拖动系统处于稳态运行中，还是动态过程中。其基本状态如下:

（1）$T_J > 0$→拖动系统加速;

（2）$T_J < 0$→拖动系统减速;

（3）$T_J = 0$→拖动系统等速运行。

2. 转矩给定信号与电动机转矩　一方面，电动机的电磁转矩 T_M 取决于转矩给定信号。当负载转矩 T_L 小于电动机转矩 T_M 时，拖动系统必加速;

另一方面，变频器在转矩控制模式下运行时，必须设置上限频率 f_H。当拖动系统的转速上升到接近于上限频率所对应的同步转速时，根据异步电动机的原理，由于转子切割磁力线的速度下降，所产生的转矩也必下降，直至 $T_M = T_L$ 时，拖动系统将在上限转速 n_H 下稳定运行。因此，当拖动系统的转速上升到上限转速时，电动机的转矩并不取决于转矩给定信号，但转矩给定信号保证了拖动系统将在上限转速下运行。

3. 转矩给定信号不变、负载转矩改变　如图 4-40a 所示，假设电动机的给定转矩 X_{TM}不变，则:

（1）在 t_1 前　负载转矩 T_L 小于电磁转矩 T_M，$T_J > 0$，拖动系统将加速，加速度随 T_J 的减小而减小，故升速过程呈半 S 状，一直加速到上限转速 n_H 为止;

（2）$t_1 \sim t_2$ 段　拖动系统的转速已经上升到上限转速 n_H，尽管与负载转矩相比，给定转矩仍较大，但因为电动机的转速已经和同步转速接近了，故电动机的实际转矩处于和负载转矩相平衡的状态;

（3）$t_2 \sim t_3$ 段　负载转矩 T_L 超过了电磁转矩 T_M，$T_J < 0$，拖动系统将降速;

（4）t_3 以后　当负载转矩 T_L 又小于 T_M 时，拖动系统又将加速到

上限转速 n_H，与 $t_1 \sim t_2$ 段的状态类似。因为是由小逐渐增大的，故升速过程呈相反的半 S 状。

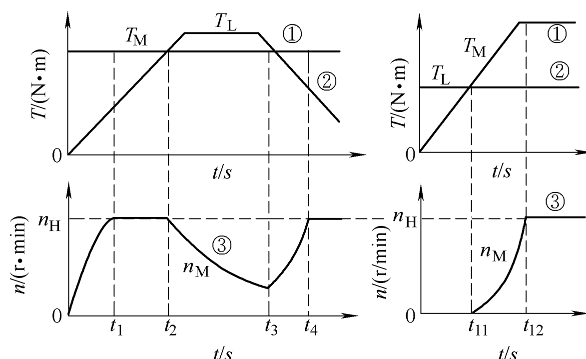


图 4-40　转矩控制时的转速

a）转矩给定信号不变　b）负载转矩不变

4. 负载转矩不变、给定转矩改变　如图 4-40b 所示，假设负载转矩 T_L 不变，则：

（1）在 t_{11}前　电磁转矩 T_M 小于 T_L，$T_J < 0$，拖动系统将不能起动；

（2）$t_{11} \sim t_{12}$段　T_M 超过了 T_L，$T_J > 0$，拖动系统开始起动并加速，直到上限转速 n_H；

（3）t_{12}以后　尽管 T_M 始终保持一个较大的数值，但因电动机的转速已经接近于同步转速，电动机的实际输出转矩将减小为与负载转矩相平衡的状态。

在转矩控制模式下，由于变频器输出频率的大小不能调节。因此，很难使拖动系统在上限频率和下限频率之间的某一转速下等速运行。

问题 56　转矩控制和转速控制之间怎样相互切换？

转矩控制方式常常应用于拖动系统在某个特定阶段的特殊运行状态，而很少应用于运行的全过程。因此，它和转速控制方式之间，常常需要进行相互切换。通常，切换工作是通过控制外接输入端子的状态来进行的。

1. 输入端子的安排　如图 4-41a 所示，开关量控制端子中：S1

预置为控制变频器的运行与停止；S3 预置为转矩控制与转速控制的切换端子。模拟量输入端子中，A1 预置为频率给定输入端；A3 预置为转矩给定输入端。

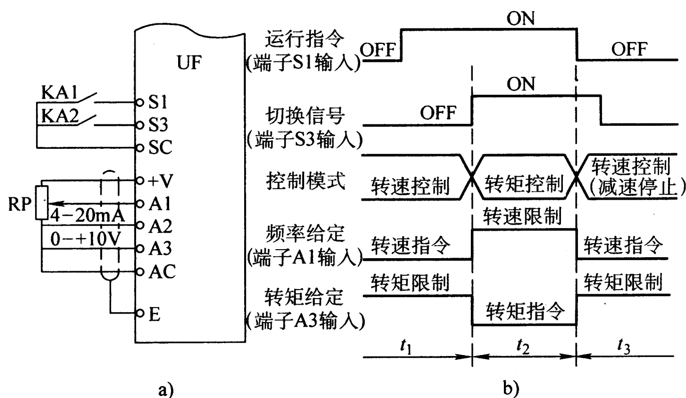


图 4-41　转矩控制与转速控制的切换
a）输入端子安排　b）切换的时序

2. 切换时序　如图 4-41b：

在 t_1 时段，变频器的 S1 端子已经得到运行指令（KA1“ON”），但 S3 端子尚未得到切换指令（KA2“OFF”），变频器处于转速控制模式，其转速大小由 A1 端输入的给定信号决定，电动机转矩的上限值由 A3 端给定信号的大小决定；

在 t_2 时段，变频器的 S3 端子得到切换指令（KA2“ON”），变频器将切换成转矩控制模式，其转矩大小由 A3 端输入的给定信号决定，变频器输出频率的上限值由 A1 端给定信号的大小决定；

在 t_3 时段，变频器的 S1 端子的运行指令结束（KA1“OFF”），这时，即使 S3 端子仍保持为“ON”状态，变频器也将自动切换成转速运行模式后减速和停止。

问题 57　电梯和电气机车采用转矩控制有什么好处？

1. 拖动系统的特点　在电梯和电气机车一类的牵引装置中，其拖动系统的主要特点如下：

（1）负载的轻重是随机的　电气机车和电梯中的乘客时多时少，无规律可循；

（2）对起动过程的要求较高　实践证明，在电气机车和电梯中，乘客的感觉和速度大小无关，但与加速度有关，与加速度的变化率关系更大。因此，要求起动和加速过程必须十分平稳。

2. 拖动系统的加速度

（1）拖动系统加速度的计算

$$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}=\frac{375T_J}{GD^2} \tag{4-16}$$

式中　$\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}$——拖动系统的加速度；

GD^2——拖动系统的飞轮力矩。

式（4-14）表明：

1）加速度与动态转矩成正比：

$$T_J\uparrow\rightarrow\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}\uparrow$$

$$T_J\downarrow\rightarrow\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}\downarrow$$

$$T_J<0\rightarrow\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}<0$$

2）加速度与飞轮力矩成反比：

$$GD^2\uparrow\rightarrow\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}\downarrow$$

$$GD_2\downarrow\rightarrow\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}t}\uparrow$$

（2）拖动系统的加速时间

$$t_{1,2}=\int_{n_1}^{n_2}\frac{GD^2}{375}\frac{\mathrm{d}n}{T_J}=\frac{GD^2(n_2-n_1)}{375T_J} \tag{4-17}$$

式中　$t_{1,2}$——从 n_1 加速（或减速）至 n_2 所需的时间；

n_1——加速（或减速）前转速；

n_2——加速（或减速）后转速。

式（4-15）表明，加速时间与动态转矩成反比：

$$T_J\uparrow\rightarrow t_{1,2}\downarrow$$

$$T_J\downarrow\rightarrow t_{1,2}\uparrow$$

3. 不同控制方式的起动过程

（1）转速控制的起动过程　在转速控制模式下，动态转矩的大小不可能根据负载轻重自动进行调整。为了防止发生起动不起来的情况，总是按负载转矩最大的情况来预置起动转矩。这样，在负载较轻的情况下，就容易在起动瞬间因发生冲击而抖动。火车在起动时常常会发生冲击，就是例子之一。

（2）转矩控制的起动过程　在转矩控制模式下，可以使电动机的电磁转矩从 0 开始逐渐增大，直至能够克服负载转矩，动态转矩和加速度才从 0 开始缓慢增加，从而使起动过程十分平稳。在图 4-42 中，图 a 是负载较轻时的情形；图 b 是负载较重时的情形。

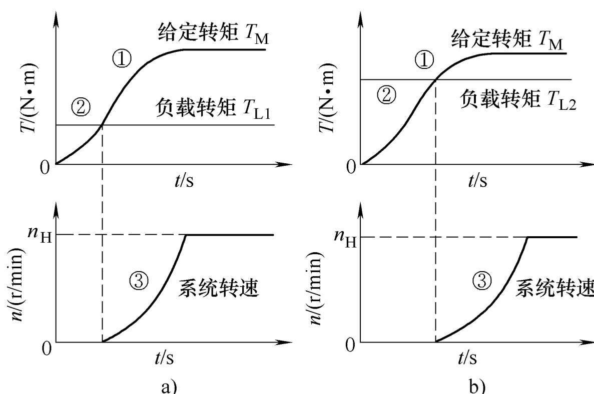


图 4-42　转矩控制用于起动

a）负载转矩较小时　b）负载转矩较大时

当拖动系统已经起动后，如果电动机的转矩给定信号还在继续增大，会导致动态转矩和加速度的不断增加，一直加速到上限转速时为止。如上述，加速度的不断增加将引起乘客的不舒适。所以，当起动到一定转速后，应切换为转速控制，使拖动系统按预置的加速时间加速到正常的运行速度。

问题 58　卷绕机械采用转矩控制有什么好处？

卷绕机械有：各种薄膜的收卷或放卷机械，如塑料薄膜、金属薄膜、纸张等在生产过程中都需要有收卷和放卷的工序；还有各种线材（如电线和电缆等）的收卷或放卷机械等。

1. 卷绕机械的基本要求　在各种薄膜或线材的生产过程中，都要求：

（1）被卷物的张力 F 必须保持恒定：

$$F = C$$

（2）被卷物的线速度 v 也必须保持恒定：

$$v = C$$

如图 4-43a 所示。

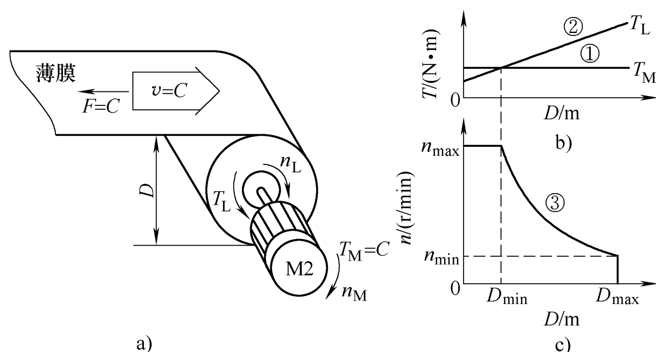


图 4-43　转矩控制模式在张力控制中的应用

a）卷绕示意图　b）转矩与卷径 c）转速与卷径

2. 卷绕机械的运行特点

随着被卷物卷径 D 的逐渐增大，必然有：

（1）负载的阻转矩随卷径的增大而增大：

$$T_L = F\frac{D}{2} \tag{4-18}$$

如图 4-43b 所示；

（2）负载的转速随卷径的增大而减小：

$$n_L = \frac{v}{\pi D} \propto \frac{1}{D} \tag{4-19}$$

如图 4-43c 所示；

（3）拖动系统的运行功率将保持恒定

$$P_L = F\ v = C$$

因此，这种负载通常被称为恒功率负载。

3. 用转矩控制实现恒张力运行

（1）薄膜线速度的控制　如图 4-44，电动机 M1 拖动导引辊，其变频器采用转速控制，用于控制薄膜线速度 v 的大小，并使线速度恒定。

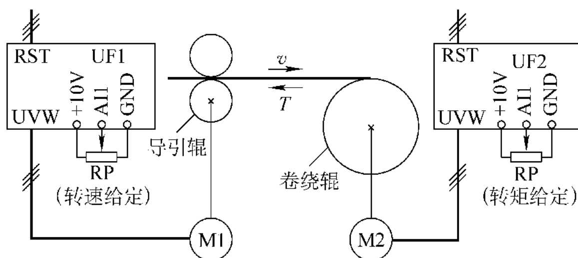


图 4-44　转矩控制的恒张力运行

（2）卷绕的恒张力控制　图 4-44 中，电动机 M2 拖动卷绕辊，其变频器在转矩控制模式下运行。

使转矩给定信号设定在某一值下不变。则电动机的电磁转矩 T_M 也将不变：

$$T_M = C$$

随着卷绕辊卷径 D 的增大，动态转矩 T_J 将变为负值，如图 4-43b 所示。拖动系统将处于减速状态，如图 4-43c 所示。

减速时的速度大小应符合能量守恒原理。

如果忽略传动系统的损失不计，则电动机的输出功率 P_M 也必保持不变：

$$P_M \approx P_L = C$$

因此，拖动系统的转速将随着卷径的增大而不断下降：

$$n_M = \frac{P_M}{T_L} \propto \frac{1}{D}$$

改变给定转矩的大小，可以改变卷绕的松紧程度。

4.9　变频调速系统的有效转矩线

问题 59　怎样描述变频调速系统的带负载能力？

有效转矩和有效转矩线　电动机在额定频率 f_N 下工作时，其允

许连续运行的最大电磁转矩称为额定转矩 T_{MN}，在机械特性上的额定工作点如图 4-45 中曲线①上之 Q_N 所示。

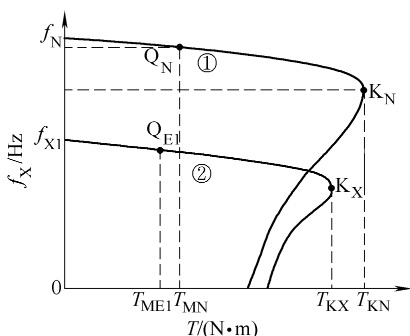


图 4-45　额频以下的有效转矩

电动机在某一频率 f_X 下工作时，其允许连续运行的最大电磁转矩，称为有效转矩 T_{MEX}，在机械特性上的有效工作点如图 4-45 中曲线②上之 Q_{E1} 所示。

将所有频率下的有效工作点连接起来，即得到电动机在变频调速过程中的有效转矩线。

有效转矩线是表明电动机在不同频率下，允许连续运行的工作范围的曲线。

严格地说，任何调速电动机都存在“有效转矩线”。但直流电动机在低速运行时，其有效转矩总等于额定转矩。所以，就没有必要再另外定义一个有效转矩线了。

问题 60　低频运行时有效转矩为什么变小？

就产生电磁转矩的能力而言，异步电动机在实现变频调速后，不论采取哪种控制方法，都能够使低频时的临界转矩达到或接近于额定频率时的临界转矩，但并不能长时间持续地运行。这是因为，普通异步电动机的散热是依靠转子轴上的扇叶来进行的。转子的转速下降后，散热效果也下降了，其运行电流和有效转矩也必须下降。

所以，低速运行时有效转矩下降的主要原因是电动机散热条件的变差。

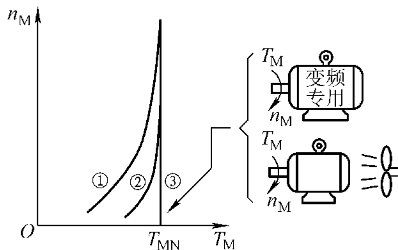


图 4-46　有效转矩线的改善

除此以外，在 V/F 控制方式下，由于低频运行时常常需要进行转矩补偿，在负荷变动时，磁路容易因饱和而发热。所以，在图 4-46 中，曲线①是 V/F 控制时的有效转矩线；曲线②是矢量控制时的有效转矩线。

问题 61　怎样使普通电动机实现恒转矩调速？

改善有效转矩线的根本途径便是加强散热。所以，实现恒转矩调速的主要方法如图 4-46 所示：

1. 外部通风　用一个风扇对着电动机吹，进行强迫冷却；

2. 采用变频调速专用电动机　在变频调速专用电动机中，在输出轴上，安装了一个按额定转速运行的风扇，改善了散热条件；同时，其电磁负荷设计得比较大，磁路不容易饱和。

在上述条件下，有效转矩线可以是恒转矩的，如图 4-46 中之曲线③所示。

问题 62　高频运行时有效转矩为什么变小？

1. 高频运行的特点

（1）输出电压不变　因为变频器的输出电压不可能超过电源电压，所以，当 $f_X > f_N$ 时，其输出电压不可能和频率一起上升，而只能保持恒值：

$$U_{1X} \equiv U_{1N}$$

（2）主磁通减小　由于 $U_{1X} \equiv U_{1N}$，反电动势 E_{1X} 的大小也基本不变。所以，当 $f_X > f_N$ 时，随着 f_X 的上升，U/f 比将下降，主磁通 Φ_1 也将减小。

（3）允许电流不变　电动机的额定电流是由电动机的允许温升决定的，所以，不管在多大的频率下工作，电动机的允许工作电流是不变的。

（4）最大输入功率基本不变　因为电动机的电压和允许电流都不变，功率因数的变化不大，所以，当频率 f_X 上升时，其最大输入功率的大小基本不变：

$$P_{1X} = 3U_{1N}I_{1N}\cos\varphi_{1X} \approx \text{const}$$

2. $f_X > f_N$ 的有效转矩线　由上述，最大输入功率既不变，如假设电动机的效率也不变，则电动机的输出功率基本不变。所以，在额定频率以上的有效转矩线具有恒功率的特点。即，有效转矩的大小与转速成反比：

$$T_{MEX} = \frac{9550P_{MN}}{n_{MX}} \propto \frac{1}{n_{MX}} \tag{4-20}$$

式中　n_{MX}——电动机在频率为 f_X 时的转速（r/min）；

T_{MEX}——转速为 n_{MX} 时的有效转矩（N · m）。

其机械特性曲线簇如图 4-47a 所示。有效转矩线如图 b 所示。

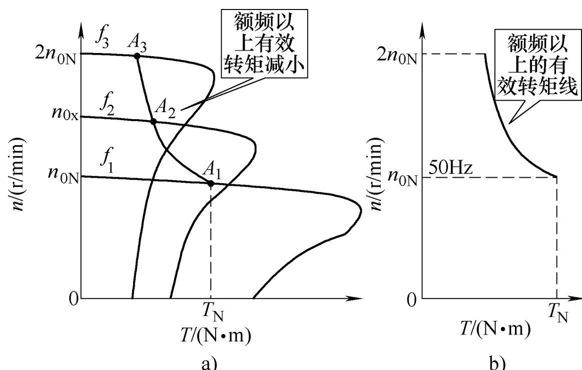


图 4-47　$f_X > f_N$ 时的机械特性和有效转矩

a）机械特性曲线簇　b）有效转矩线

如频率调节比为

$$k_F = \frac{f_X}{f_N} \tag{4-21}$$

式中　k_F——频率调节比；

f_X——工作频率（Hz）；

f_N——额定频率（Hz）。

则

$$T_{MEX} = \frac{T_{MN}}{k_F} \tag{4-22}$$

式（4-22）表明，在额定频率以上，电动机的有效转矩与频率调节比成反比。

问题 63　电动机的工作频率最高可以到多大？

1. 高速运行存在的问题　电动机的转速超过了额定转速后，需要注意的问题有。

（1）轴承的承受能力　我国通用轴承的最高连续运行转速约为 4000r/min 左右；

（2）转子的动平衡　我国多数电机生产厂的动平衡测试，是在 3000 ~ 4000r/min 的条件下进行的。

综上所述，通用电动机的转速不宜超过 4000r/min。

2. 高频运行存在的问题　由于电动机有效转矩的大小是和频率成反比的，频率太高了，电动机的有效转矩减小太多，实用价值不大。

问题 64　如把基本频率预置为 45Hz 会有什么结果?

1. 电动机的磁通　把基本频率预置为 45Hz 后的 U/f 线如图 4-48a 中曲线①所示。在变频器的输出频率 f' 为 45Hz 时，对应的输出电压为 380V。与正常情况相比，U/f 的比值增加了 11%：

$$\frac{U_N}{f'} = 1.11 \frac{U_N}{f_N} \tag{4-23}$$

因此，电动机内的磁通也比额定状态下增加了 11%。由于增加得不多，电动机的磁路虽已接近饱和，但尚未饱和。

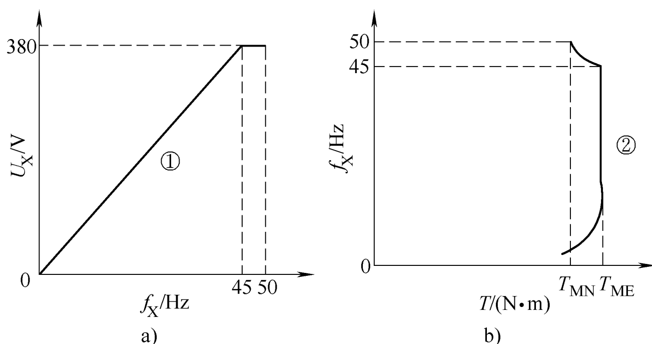


图 4-48　基本频率为 45Hz 时的情形
a）U/f 线　b）有效转矩线

2. 电动机的有效转矩　在额定电流不变的情况下，磁通的增加将使电动机的有效转矩也增大 11%，如图 b 中曲线②所示。但如把变频器的输出频率增加至 50Hz 时，则因为对应的电压仍为 380V，故有效转矩与额定转矩相等。

由此可以看出，如果负载的工作频率小于 50Hz 的话，适当降低基本频率，可以增大电动机的有效转矩。

问题 65　低频运行时，电动机的功率会变小吗?

一般说来，电动机在额定转速以下运行时，其输出功率都会变

小。这是因为：

1. 电磁转矩不增加　任何电动机的电磁转矩都是电流和磁通相互作用的结果。通常电动机的电流和磁通都不允许超过额定值。因为磁通太大了使磁路饱和，电流太大了使电动机发热。

所以，低速运行时，电动机的电磁转矩是不可能增大的。

2. 功率将随转速变化　因为机械功率是与转矩和转速的乘积成正比的。低速运行时，转矩不变而转速下降，故电磁功率是随转速而下降的，如图 4-49 所示。

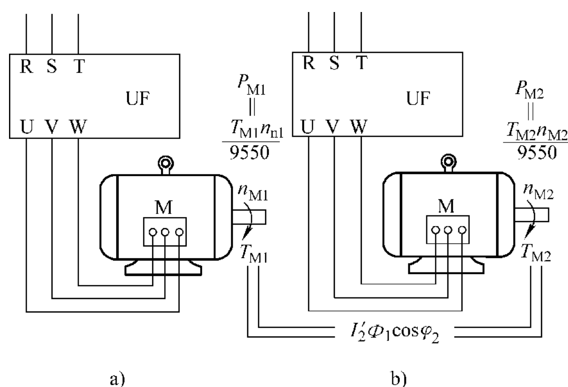


图 4-49　电动机低速运行时的功率

a）转速为 n_1 时　b）转速为 n_2 时

第 5 章　变频器的控制电路

5.1　变频器控制电路的安排

问题 1　变频器内部控制电路框图是怎样的?

变频器内部的控制电路框图如图 5-1 所示。说明如下：

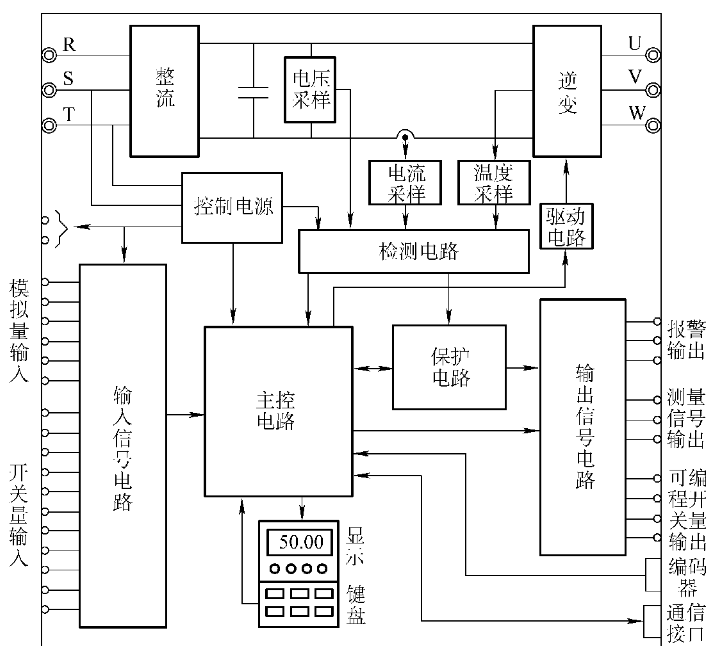


图 5-1　变频器内的控制电路框图

1. 主控电路　主要功能如下：

（1）接受各种信号

1）在功能预置阶段，接受对各功能的预置信号；

2）接受从键盘或外接输入端子输入的给定信号；

3）接受从外接输入端子或通信接口输入的控制信号；

4）接受从检测电路输入的检测信号；

5）接受从保护电路输入的保护执行信号等。

（2）进行基本运算　最主要的运算包括：

1）进行矢量控制运算或其他必要的运算；

2）实时地计算出 SPWM 波形各切换点的时刻。

（3）输出计算结果

1）输出至逆变管模块的驱动电路，使逆变管按给定信号及预置要求输入 SPWM 电压波。

2）输出给显示器，显示当前的各种状态。

3）输出给外接输出控制端子。

4）向保护电路发出保护指令，以进行保护。

2. 检测电路　接受电压、电流以及模块温度等采样信号，并转换成主控电路所能接受的信号；

3. 保护电路　接受主控电路输入的保护指令，并实施保护。同时也直接从检测电路输入检测信号，以便对某些紧急情况实施保护。

问题 2　变频器和外部控制电路之间是怎样联系的？

主要通过外接端子进行联系，如图 5-2 所示。外接端子有两大类：

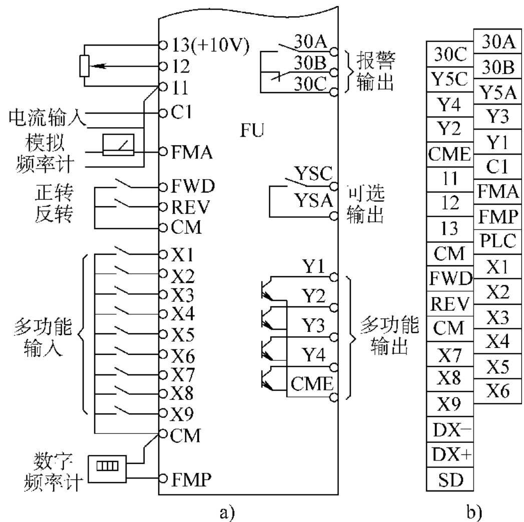


图 5-2　变频器的外部控制端子

a）外控接线图　b）控制端子的安排

1. 输入信号端子　从外部输入的各种控制信号，输入至变频器的“输入信号电路”，经输入信号电路接受后把信号传至主控电路。

2. 输出信号端子　主要有报警信号输出端子、外接测量端子、多功能状态信号输出端子等。

问题 3　变频器的外接输入端子有哪些？

1. 模拟量输入端　即从外部输入模拟量信号的端子，如图 5-2 中之端子 12 和 C1。变频器配置的模拟量输入信号有：

（1）按输入信号的物理量分

电压信号：如 0 ~ +10V、0 ~ ±10V、0 ~ +5V、0 ~ ±5V 等；

电流信号：如 0 ~ 20mA，4 ~ 20mA 等。

（2）按功能分

主给定信号：如主要的频率给定信号、PID 控制的目标给定信号等；

辅助给定信号：如叠加到主给定信号的附加信号、PID 控制的反馈信号等。

2. 开关量输入端　接受外部输入的各种开关量信号，以便对变频器的工作状态和输出频率进行控制。主要有以下几类：

（1）基本控制输入端　如正转（FWD）、反转（REV）、点动（JOG）、复位（RST）等，基本控制输入端在多数变频器中是单独设立的，其功能比较固定；

（2）可编程输入端　端子的具体功能须通过功能预置来决定，如多挡转速控制，多挡升、降速时间控制，可编程序控制等。

问题 4　变频器是怎样接收外接开关量信号的？

图 5-1 中输入信号电路的结构如图 5-3 所示。

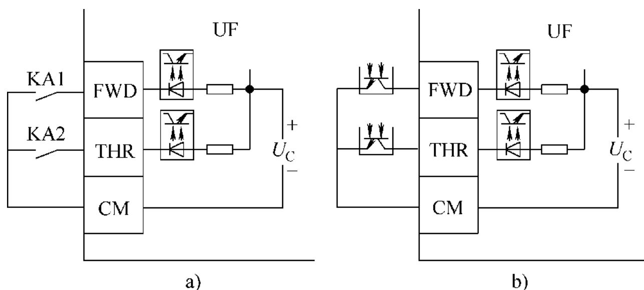


图 5-3　输入信号电路

a）外控信号为有触点开关　b）外控信号为无触点开关

例如，当外接端子 FWD 的外控电路接通（KA1 闭合）时，变频器内光电耦合管的二极管部分有电流流过，其三极管部分导通，进而控制其他器件。

外控开关器件可以是有触点的，如图 a 所示；也可以是无触点的，如图 b 所示。

问题 5　变频器的外接输出端子有哪些？

主要有三种类型：

1. 报警输出端　当变频器因故障而跳闸时，报警输出端将动作，发出报警信号。

报警输出端通常都采取继电器输出，可以直接接到 AC220V 的电路中。如图 5-4a 中之 MA、MB、MC 和图 b 中之 RO31、RO32、RO33 所示。

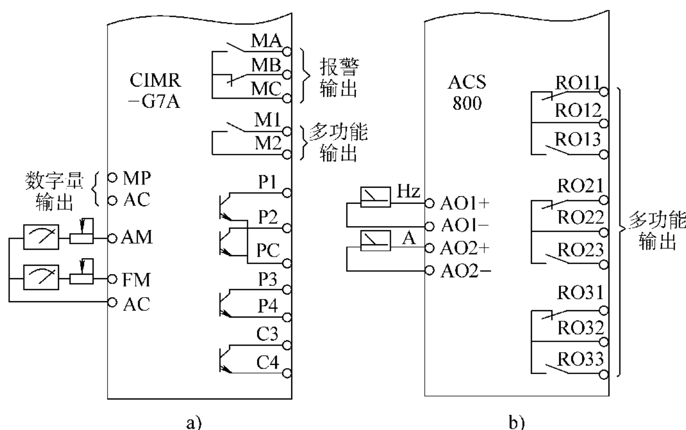


图 5-4　输出信号端子

a）安川 G7A 变频器　b）ABB—ACS800 变频器

2. 测量信号输出端　向外接仪表提供与运行参数成正比的测量信号。测量信号有两类：

（1）模拟量信号　如图 5-4a 中之 AM 端和 FM 端和图 b 中之 AO1、AO2 所示；

（2）脉冲信号　其脉冲频率与被测参数成正比，如图 5-4a 中之 MP—AC 所示。

3. 状态信号输出端　输出变频器的各种运行状态的信号，输出内容如："运行"信号、"频率到达"信号、"频率检测"信号等。各输出端的具体输出内容可通过功能预置来设定，故常称为多功能输出端。

问题 6　变频器是怎样提供外接开关量信号的?

变频器的开关量输出信号电路主要有三种类型:

1. 晶体管输出型　如图 5-5a 所示，输出信号为集电极开路输出，由于受到晶体管耐压的限制，只能用于直流低压电路中;

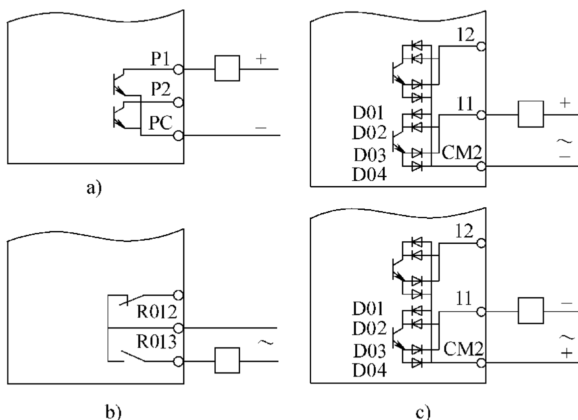


图 5-5　输出信号电路的类型

a）晶体管输出型　b）继电器输出型

c）晶体管双向输出型

2. 继电器输出型　如图 5-5b 所示，输出端由继电器触点构成。由于继电器触点的耐压较高，故大多数可用在交流 220V 电路中;

3. 晶体管双向输出型　如图 5-5c 所示，举例说明如下:

如外电路为上"+"、下"–"，则电流从端子"11"流入，经二极管 D02、输出晶体管和二极管 D04 后到端子"CM2";

如外电路为上"–"、下"+"，则电流从端子"CM2"流入，经二极管 D01、输出晶体管和二极管 D03 后到端子"11"。

所以，双向输出型可以用在低压交流电路中。

5.2　变频器的外接输入端子

问题 7　怎样确定通过外接端子进行操作？

变频器的操作方式需要通过功能预置来选定，见表 5-1。

表 5-1　操作方式的选择功能举例

变频器型号	功能码	功能名称	数据码	数据码含义
艾默生 TD3000	F0. 05	运行命令选择	0	键盘控制
			1	端子控制
			2	通讯控制
三菱 FR—A540	Pr. 59	遥控设定功能选择	0	遥控功能无效
			1	遥控功能有效,停电后有记忆功能
			2	遥控功能有效,停电后无记忆功能
丹佛士 VLT5000	002	操作器/外部控制	0	外部控制
			1	操作器控制

问题 8　变频器外接的基本操作功能有哪些？

变频器的外接输入控制端子中，有一部分端子的功能是固定的，或出厂设定中已有明确功能，也可以通过功能预置更改的。这部分输入端子称为基本操作输入端。各种变频器对基本操作输入端的设置不尽相同，图 5-6 是两个例子。

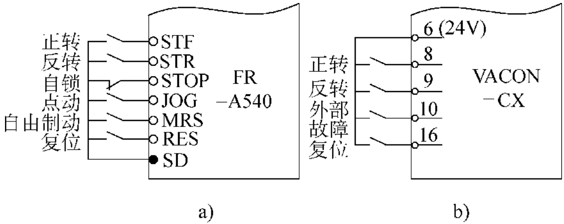


图 5-6　基本操作输入端举例

a）三菱 FR—A540 变频器　b）瓦萨 CX 变频器

图 a 是三菱 FR—A540 系列变频器的配置，其基本操作输入端有正转、反转、自锁、点动、自由制动、复位等；

图 b 是瓦萨 CX 系列变频器的配置，其基本操作输入端有正转、反转、外部故障、复位等。

可见，配置的差异是比较大的。

问题 9　变频器怎样实现点动控制?

1. 键盘控制　多数变频器的面板上有点动键（JOG键）。点动时，只需按JOG键即可，如图 5-7a 所示。点动方向、点动频率以及点动时的加、减速时间都通过功能预置来决定。

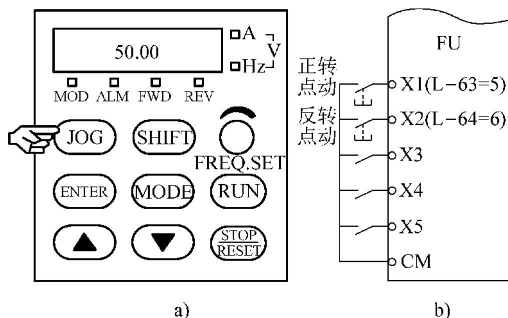


图 5-7　点动控制

a）键盘控制　b）外接端子控制

2. 外接输入端子控制　在多功能输入端子中，任选两个端子（如 X1、X2 端）作为正、反转点动信号输入端。以康沃 CVF—G2 系列变频器为例：

将功能码 L—63（输入端子 X1 功能选择）预置为“5”，则该输入端即为“正转点动控制”输入端；

将功能码 L—64（输入端子 X2 功能选择）预置为“6”，则该输入端即为“反转点动控制”输入端。

操作时，接通 X1，即为正转点动控制；接通 X2，即为反转点动控制。

问题 10　什么是三线控制?

和接触器控制电路类似，如图 5-8a 所示。当按下动合（常开）按钮 SF 时，电动机正转起动，由于 EF 端子具有保持（自锁）功能，松开 SF 后，电动机的运行状态将能继续下去；当按下动断按钮 ST

时，EF 和 COM 之间的联系被切断，自锁解除，电动机将停止。这样，只需要两个按钮开关就可以进行电动机的起动和停止控制了。

图 5-8b 所示是自锁功能的另一种形式，其特点是可以接受脉冲信号进行控制。

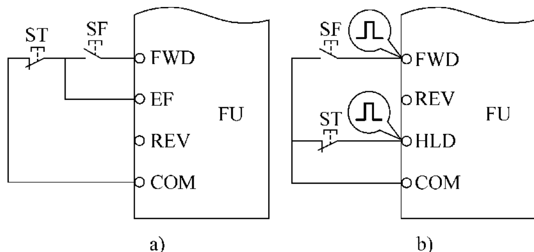


图 5-8　三线控制

a）方式 1　b）方式 2（可脉冲控制）

由于自锁控制需要将控制线接到三个输入端子，故在变频器说明书中，常称为“三线控制”方式。

问题 11　有一台机器需要经常点动，原来的点动与运行的切换电路如图 5-9a 所示。改为变频调速后希望操作方法不变，怎么处理？

图 5-9a 所示的原电路，实质上是切换自锁电路的“有效”与“无效”：当切换开关投向“R”时，自锁电路接通，按 SF 按钮，接触器 KM 得电，电动机运行，松开 SF，由于接触器 KM 已经自锁，电动机继续运行；当切换开关投向“J”时，自锁电路断开，按 SF 按钮，接触器 KM 得电，电动机运行，松开 SF，接触器 KM 断电，电动机停止，处于点动状态。

采用变频调速后，首先在多功能输入端子中任选一个（如选择 X6）作为自锁控制端。以康沃 CVF—G2 系列变频器为例，则将功能码 L—68（输入端子 X6 选择功能）预置为“17”（三线式运转控制）。然后仿照原控制电路的思路，在 X6 电路中串联切换开关 SA。则：当 SA 投向“R”时，X6 接通，自锁功能有效。按下 SF，电动机运行，松开 SF，电动机继续运行；当 SA 投向“J”时，X6 断开，自锁功能无效。按下 SF，电动机运行，松开 SF，电动机停止。

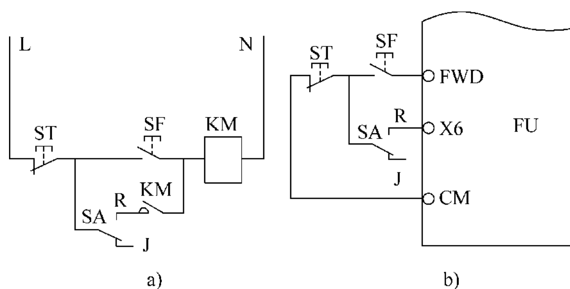


图 5-9 点动与运行的切换电路

a）原来的切换电路 b）变频后的切换电路

问题 12 变频器怎样实现外接升、降速控制？

变频器的可编程外接端子中，可以任意选择两个端子，通过功能预置，使它们具有升、降速功能。

如图 5-10 所示，通过功能预置，使端子 X1 为“升速端子”，X2 为“降速端子”，则：

按下 SB1 时，变频器的输出频率上升，松开 SB1，变频器的输出频率保持不变（通过预置，也可以使输出频率回复至原来的频率）；

按下 SB2 时，变频器的输出频率下降，松开 SB2，变频器的输出频率保持不变（通过预置，也可以使输出频率回复至原来的频率）。

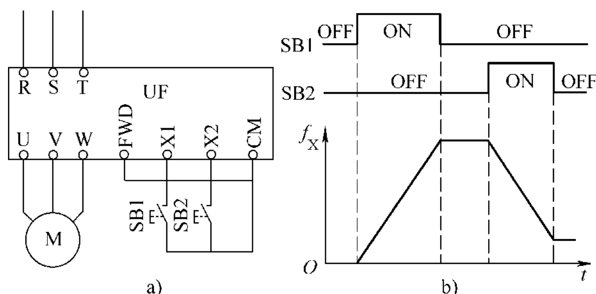


图 5-10 外接升、降速端子

a）外接升、降速端子接法 b）功能示意图

问题 13 升、降速端子可以代替电位器吗？

可以代替，如图 5-11 所示：

按下 SB1→X1 接通→频率上升；
松开 SB1→X1 断开→频率保持不变；
按下 SB2→X2 接通→频率下降；
松开 SB2→X2 断开→频率保持不变。

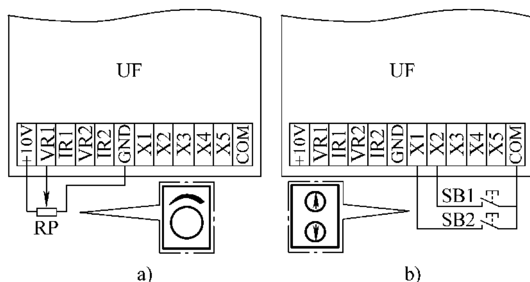


图 5-11　用升降速端子给定代替电位器给定
a）升降速端子给定　b）电位器给定

与电位器给定相比，升降速端子给定具有如下优点：

1. 寿命长　电位器容易磨损，而按钮开关则不易损坏；

2. 调速精度高　电位器给定属于模拟量给定，而升降速端子给定是数字量给定，故精度高；

3. 抗干扰能力强　因为升降速端子给定的控制信号是开关量，故抗干扰能力比模拟量给定强得多。

问题 14　锅炉风机变频调速时要求在炉前和楼上控制室都能调速，怎样实现？

可利用变频器输入控制端子中的升速和降速功能来实现。如图 5-12，将变频器输入端子中的 X1 和 X2 分别预置为升速端子和降速端子。将两组按钮开关分别装在两个操作盒内：

CA 为炉前操作盒，内装 SB1、SB2 和频率计 FA；CB 为控制室操作盒，内装 SB3、SB4 和频率计 FB。

将 SB1 和 SB3 并联，用于控制升速端子 X1。不论在炉前按 SB1，或在控制室按 SB3，变频器都能升速；

又将 SB2 和 SB4 并联，用于控制降速端子 X2。不论在炉前按

SB2，或在控制室按 SB4，变频器都能降速。

如将变频器的模拟量输出端预置为 0～20mA 电流输出，则两个频率计 FA 和 FB 串联后接至 FM 和 CM2 之间。

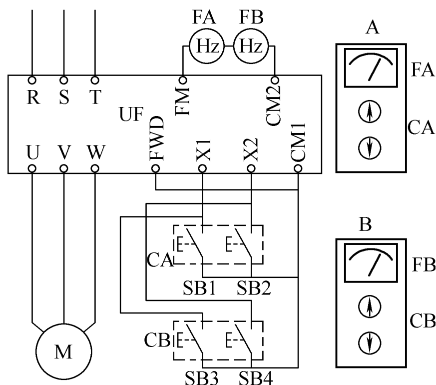


图 5-12　两地升降速控制

问题 15　怎样利用电触点压力表实现简易的恒压供水控制？

在供水系统中，用户的用水流量是时刻变化的，为了使水泵的供水能力和用户的用水流量始终处于平衡状态，常用的方法便是进行恒压供水控制。即，保证水泵出口处的压力恒定。

这是因为，如果用户的用水流量增大了，水泵出口处的压力必下降，则应提高水泵的转速，从而提高水泵的供水能力。反之，如果用户的用水流量减小了，水泵出口处的压力必上升，则应降低水泵的转速，减小水泵的供水能力。

由于在供水系统中，对压力偏差的要求并不十分严格，所以，有的用户希望使用他们所熟悉的电接点压力表来进行恒压供水控制，这种压力表在压力的上限位和下限位都有电接点（上、下限位置可调），比较直观，也比较价廉，又不必进行 PID 调节，用户较易掌握，因此，为相当一部分用户所喜欢。

利用升、降速端子配合电接点压力表进行恒压供水的基本电路如图 5-13 所示：压力表的下限触点接至升速端子 X1，上限触点接至降速端子 X2，指针上的动触点则接至公共端 COM。

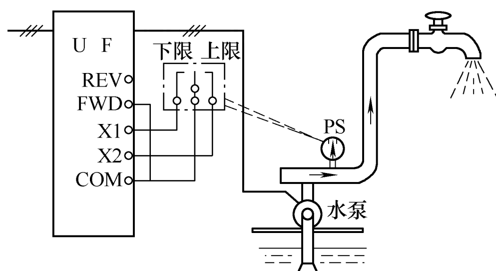


图 5-13　利用升、降速端子进行恒压控制

当用水流量较大，压力下降时，如下降至低于下限压力，指针上的动触点与下限触点相接触，使 X1—COM 接通，变频器的输出频率上升，水泵的转速及流量也上升，从而使压力升高。随着压力的不断升高，指针上的动触点将脱离下限触点，X1—COM 断开，变频器的输出频率停止上升，水泵将维持在已经上升了的转速和流量的状态下运行。

反之，当用水流量较小，压力上升时，如上升至高于上限压力，指针上的动触点与上限触点相接触，使 X2—COM 接通，变频器的输出频率下降，水泵的转速及流量也下降，从而使压力降低。随着压力的不断降低，指针上的动触点将脱离上限触点，X2—COM 断开，变频器的输出频率停止下降，水泵将维持在已经下降了的转速和流量的状态下运行。

问题 16　怎样实现多挡转速控制？

变频器的外接输入控制端子中，通过功能预置，可以将若干个（通常为 2～4 个）输入端作为多挡（3～16 挡）转速控制端。其转速的切换由外接的开关器件通过改变输入端子的状态及其组合来实现，转速的挡次是按二进制的顺序排列的，故二个输入端可以组合成 3 或 4 挡（0 状态不计时为 3 挡，0 状态计入时为 4 挡）转速，三个输入端可以组合成 7 或 8 挡（0 状态不计时为 7 挡，0 状态计入时为 8 挡）转速，四个输入端可以组合成 15 或 16 挡（0 状态不计时为 15 挡，0 状态计入时为 16 挡）转速。

现以三个输入端为例，说明如下：

如图 5-14 所示，假设输入端子 X1、X2、X3 被预置为多挡转速的信号输入端，则通过继电器 KA1、KA2、KA3 的不同组合，可输入 7 挡或 8 挡转速信号。

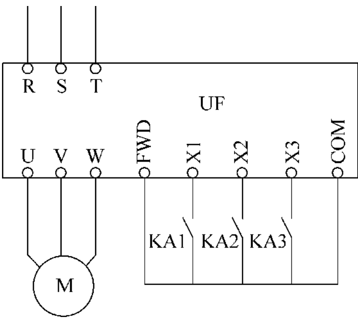


图 5-14　变频器的多挡转速控制

由于三个端子是任选的，又由于每一个端子代表二进制数字中的一“位”。因此，在把三个端子预置为多挡转速功能时，必须注意它们的顺序。例如：

X1 预置为最低位；

X2 预置为中间位；

X3 预置为最高位。

则转速挡次与各输入端状态之间的关系见表 5-2。

表 5-2　转速挡次与各输入端状态之间的关系

各输入端子状态			转速挡次
X3	X2	X1	
OFF	OFF	OFF	0
OFF	OFF	ON	1
OFF	ON	OFF	2
OFF	ON	ON	3
ON	OFF	OFF	4
ON	OFF	ON	5
ON	ON	OFF	6
ON	ON	ON	7

问题 17　进行多挡转速控制时须预置哪些功能？

在使用多挡转速功能时，须进行两步预置：

第一步：通过预置，确定哪几个输入端子为多挡转速输入端子；

第二步：预置与各挡转速对应的工作频率。

举例如下：

1. 康沃 CVF—G2 系列变频器

第一步：将功能码 L—63 预置为“1”、L—64 预置为“2”、L—65 预置为“3”，L—66 预置为“4”，则输入控制端子 X1、X2、X3、X4 即成为多挡转速输入端子。

第二步：通过功能码 L—18 ~ L—32 分别预置各挡（15 挡）转速对应的频率。

2. 安川 CIMR—G7A 系列变频器

第一步：将功能码 H1—01 预置为“3”、H1—02 预置为“4”、H1—03 预置为“5”，则输入控制端子 S3、S4、S5 即成为多挡转速输入端子。

第二步：通过功能码 d1—01 ~ d1—08 分别预置各挡（8 挡）转速对应的频率。

问题 18　怎样利用继电器进行多挡转速控制？

多挡转速控制电路的任务，是把操作工选择的转速挡次转换成变频器 3 个（或 4 个）输入端子对应的状态。

操作工进行操作的，或者是转换开关，如图 5-15a 所示，或者是按钮开关，如图 b 所示。控制电路如图 c 所示，7 个按钮开关 SB1 ~ SB7 分别控制 7 个小继电器 KA1 ~ KA7。这 7 个按钮开关是带机械联锁的，即任何一个按下后，其余 6 个都处于断开状态。继电器可选择 24V 的直流继电器，直接利用变频器提供的 24V 电源。要注意变频器电源的负载能力，例如森兰 SB70 系列变频器中，24V 电源所能提供的最大电流是 80mA，所以在选购继电器时，其线圈电阻必须大于 300Ω。

至于具体控制 X1、X2、X3 的电路，先要找出各端子的规律：在表 5-2 中可以看出：端子 X1 在第 1、3、5、7 挡转速时处于‘1’状态，所以，由 KA1、KA3、KA5、KA7 来控制它的信号；端子 X2 在第 2、3、6、7 挡转速时处于‘1’状态，所以，由 KA2、KA3、KA6、KA7 来控制它的信号；端子 X3 在第 4、5、6、7 挡转速时处于‘1’状态，所以，由 KA4、KA6、KA5、KA7 来控制它的信号。

现举例说明如下：当按第五挡按钮时，则 KA5 的线圈得电，结果，X1 端子和 X3 端子被同时接通，三个端子的状态组合成‘101’，即第五挡转速。

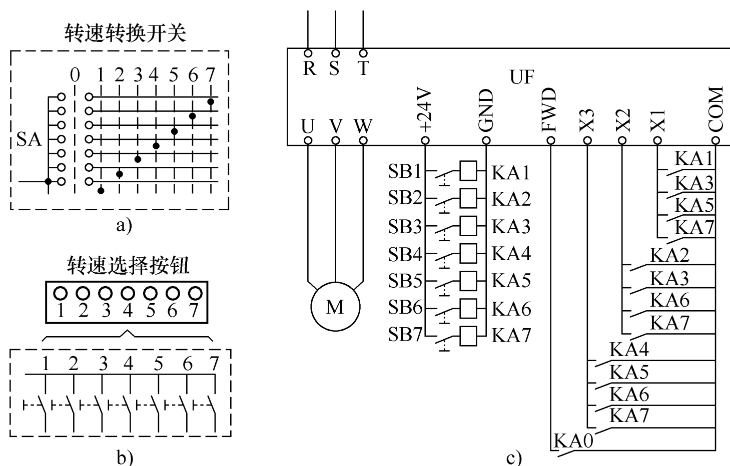


图 5-15　多挡转速控制的实施
a）用转换开关　b）用按钮开关　c）控制电路

问题 19　同一个电力拖动系统，有必要改变加、减速时间吗？

在某些情况下，加、减速时间是有必要调整的，例如：

1. 加工工艺的要求　如龙门刨床在刨刀未切入工件前，首先加速至较低转速。这个加速过程是在空载情况下进行的，加速时间可以预置得短一些；当刨刀切入工件后，再加速至所要求的刨削速度时，由于加速是在刨削过程中进行的，为了防止工件和刀具的损坏，加速时间应该长一些。

2. 控制不同机台的要求　如某些小型桥式起重机的大车和小车是不允许同时运行的，因此，可以用同一台变频器控制其运行。但因为大车拖动系统的惯性较大，其加、减速时间应适当地预置得长一些，而小车拖动系统的惯性较小，其加、减速时间应该适当地预置得短一些。

问题 20　怎样实现多挡加减速控制？

与多挡频率控制类似，在变频器的外接输入控制端子中，通过功能预置，可以将若干个（通常为 2 ~ 3 个）输入端作为多挡（3 ~ 7

挡）加、减速时间的控制端，如图 5-16 所示。其加、减速时间的切换由外接的开关器件通过改变输入端子的状态及其组合来实现，转速的挡次是按二进制的顺序排列的。

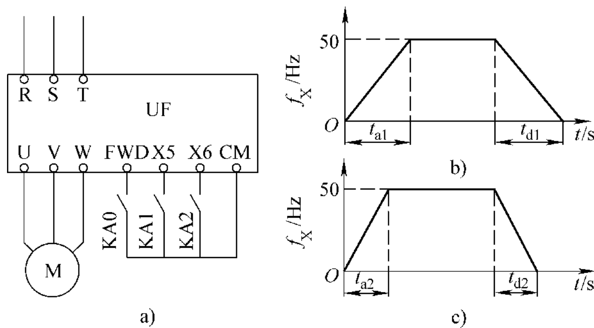


图 5-16　多挡加、减速控制

a）端子接线　b）第一加减速　c）第二加减速

假设输入端子 X5、X6 被预置为多挡加、减速时间的信号输入端，则通过继电器 KA1、KA2 的不同组合，可输入 3 挡或 4 挡加、减速时间信号（0 状态不计时为 3 挡，计入时为 4 挡），如图 5-16 所示。

加减速时间挡次与各输入端状态之间的关系见表 5-3。

表 5-3　加减速时间挡次与各输入端状态之间的关系

X6	X5	加减速挡次
OFF	ON	1
ON	OFF	2
ON	ON	3
OFF	OFF	0

问题 21　进行多挡加减速控制时须预置哪些功能？

与多挡转速功能相仿，也需进行两步预置。以艾默生 TD3000 系列变频器为例，预置步骤如下：

功能码 F5. 05 的数据码预置为“4”，则 X5 端子为第 1 挡加减速时间信号；

功能码 F5. 06 的数据码预置为“5”，则 X6 端子为第 2 挡加减速时间信号；

功能码 F0. 10 的数据码预置为“10”，则第 1 挡加速时间为 10s；

功能码 F0. 11 的数据码预置为“10”，则第 1 挡减速时间为 10s；

功能码 F2. 18 的数据码预置为“7”，则第 2 挡加速时间为 7s；

功能码 F2. 19 的数据码预置为“7”，则第 2 挡减速时间为 7s。

问题 22　桥式起重机的大车和小车如不允许同时运行，能否共用 1 台变频器？

可以共用。两者的转速控制方法可以相同。但由于两者的惯性大小不一样，它们的加、减速时间也应该有所区别，如图 5-17 所示。

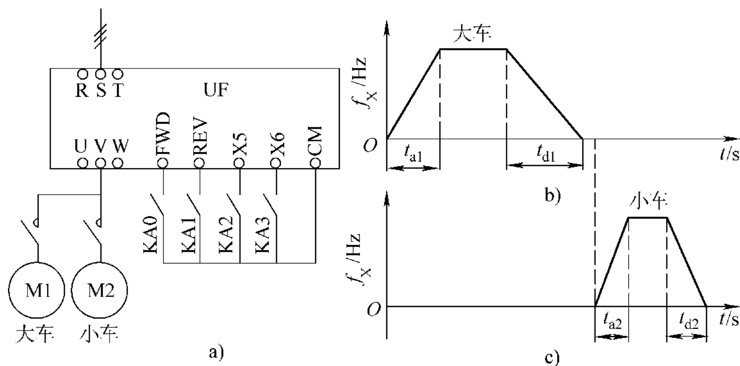


图 5-17　桥式起重机大车与小车的加减速控制

a）加减速控制电路　b）大车加减速时间　c）小车加减速时间

以选用康沃 CVF—G2 变频器为例，说明如下：

将功能码 L—67（端子 X5 的功能选择）预置为“9”，则端子 X5 为第 1 加、减速时间选择端；

将功能码 L—68（端子 X6 的功能选择）预置为“10”，则端子 X6 为第 2 加、减速时间选择端；

当大车电动机与变频器相接时，令继电器 KA2 动作，则端子 X5 得到信号，采用第 1 挡加速时间和第 1 挡减速时间，如图 b 所示；

当小车电动机与变频器相接时，令继电器 KA3 动作，则端子 X6 得到信号，采用第 2 挡加速时间和第 2 挡减速时间，如图 c 所示。

问题 23　外接输入端子可以预置哪些选择功能？

变频器还可以通过功能预置使各输入控制端子具有选择功能，以安川 CIMR—G7A 系列变频器为例，可供选择的功能多达六十余种，现选择几种主要的功能如图 5-18 所示，说明如下：

1. 速度控制与转矩控制的选择功能　ON 时为转矩控制；OFF 时为速度控制。

2. PID 的选择功能　ON 时 PID 控制无效；OFF 时 PID 控制有效。

3. 直流制动指令的选择功能　ON 时直流制动指令有效，电动机进行直流制动；OFF 时外部无直流制动指令。

4. 模拟量给定信号相加功能的选择　ON 时可进行模拟量给定之间的相加；OFF 时不能相加。

5. 模拟量给定信号相减功能的选择　ON 时可进行模拟量给定之间的相减；OFF 时不能相减。

6. V / F 方式时的转速反馈选择　ON 时转速反馈无效；OFF 时有效。

7. 零伺服指令的选择功能　ON 时零伺服指令有效，OFF 时无效。

8. 电动机的切换功能　当一台变频器控制两台不同时运行的电动机时，对被控电动机进行切换，ON 时 2#电动机运行；OFF 时 1#电动机运行。

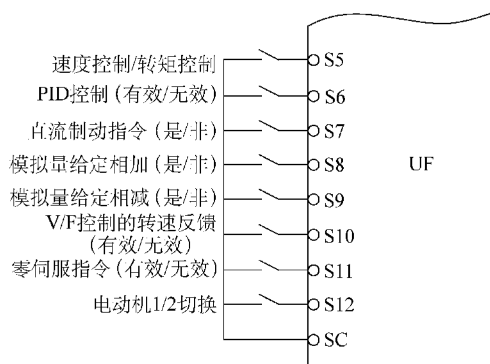


图 5-18　输入控制端子的选择功能

5.3　变频器的外接输出端子

问题 24　怎样利用报警输出端子?

对报警输出端子的利用主要有两个方面，具体电路如图 5-19 所示。

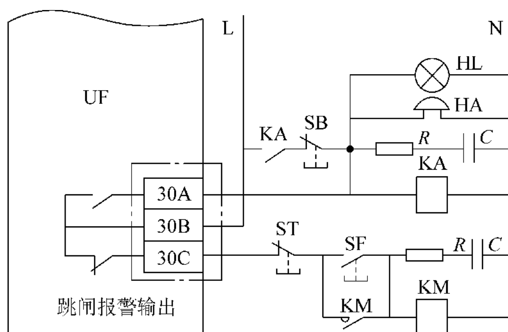


图 5-19　报警端子的应用电路

1. 切断变频器电源　图中接触器 KM 是用来接通变频器电源的，报警输出的动断（常闭）触点“30B—30C”串联在 KM 的线圈电路内。为了保护报警输出的触点，在接触器的线圈两端，应并联阻容吸收电路（图中之 R—C 电路）。

当变频器因故障而跳闸时，触点“30B—30C”断开，KM 的线圈断电，其主触点使变频器切断电源。

2. 进行声光报警　声光报警电路由报警输出的动合（常开）触点“30B—30A”控制。当变频器跳闸时，触点“30B—30A”闭合，将报警指示灯 HL 和电笛 HA 接通，进行声光报警。

与此同时，继电器 KA 得电，其触点将声光报警电路自锁，使变频器断电后，声光报警能持续下去，直至工作人员按下 SB 为止。

继电器线圈和电笛线圈的两端，也需要并联阻容吸收电路，以保护触点。

问题 25　怎样选择和处理外接测量仪表?

变频器的外接模拟量输出端子主要用于测量变频器的运行数据，如输出频率、输出电流和输出电压等，如图 5-20a 所示。

但变频器所提供的模拟量信号都是与被测参数成正比的低压直流电压或直流电流。用户在市场上也只能买到低压的直流电压表或直流毫安表。因此，需要进行必要的技术处理，如图 5-20b 所示。

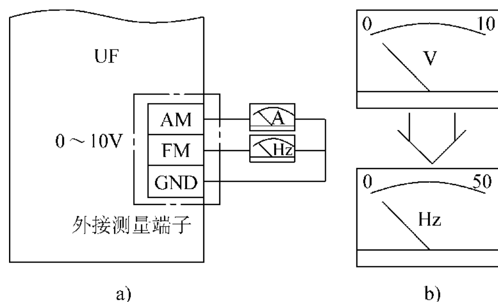


图 5-20　模拟量输出端子的应用

a）应用电路　b）仪表的处理

不同变频器的模拟量输出信号也不一样，主要有 0～10V、0～20mA、0～1mA 等几种，必须注意说明书中的相关说明。

现以 0～10V 的电压表测量变频器的输出频率为例，说明如下：假设变频器的最高频率预置为 0～50Hz，则仪表的 10V 与 50Hz 相对应，只需将仪表的刻度盘作如图 b 所示的处理就可以了。

问题 26　外接仪表的读数与显示屏不一样，怎么办？

通常有两种办法：

1. 设定调整　即通过功能预置来校准。例如：

康沃 CVF—G2 系列变频器中：

功能码 b—12 预置模拟输出 AM 端子的增益，数据码范围是 0.50～2.00；

功能码 b—13 预置模拟量输出 FM 端子的增益，数据码范围是 0.10～5.00；

功能码 b—14 预置模拟输出 AM 端子的偏置，数据码范围是 -1.00～1.00。

富士 G11S 系列变频器中：

功能码 F30 预置 FMA 端子的电压调整，数据码范围是 0～200%。

瓦萨 VACON—CX 系列变频器中：

功能码 3.5 预置模拟输出的比例尺，数据码范围是 10% ~ 1000%。

2. 通过外接电位器来校准，如图 5-21 所示。

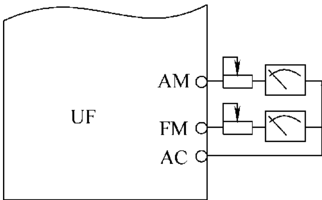


图 5-21　外接仪表的调整

问题 27　能否通过模拟量输出信号得到较多档次的控制信号?

方法可有多种。这里介绍一种利用“点条转换”集成电路得到多档控制信号的方法，如图 5-22 所示。

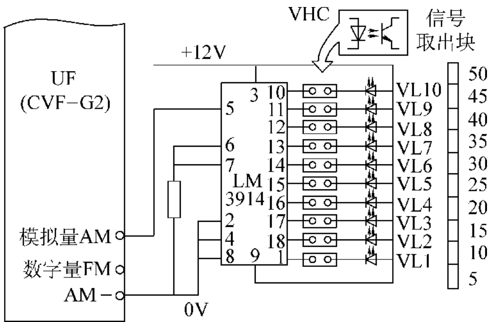


图 5-22　将模拟量转换成多档控制信号

以采用康沃 CVF—G2 变频器为例，将功能码 b—10 预置为“0”，则 AM 端子输出的即为与输出频率成正比的电压信号。利用“点—条转换”集成电路 LM3914，可以把频率信号转换成 10 挡开关信号。既可以用发光二极管 VL 粗略地显示当前的输出频率，也可以用光电耦合管 VHC 得到与所需频率对应的控制信号。

问题 28　怎样利用多功能输出端子?

多数日本变频器的多功能输出信号都是晶体管集电极开路输出

的，不消说，它只能用在低压直流电路中，如图 5-23a 所示。

而多数欧美变频器的多功能输出信号都是继电器输出的，它可以直接用在交流 220V 的电路中，如图 5-23b 所示。

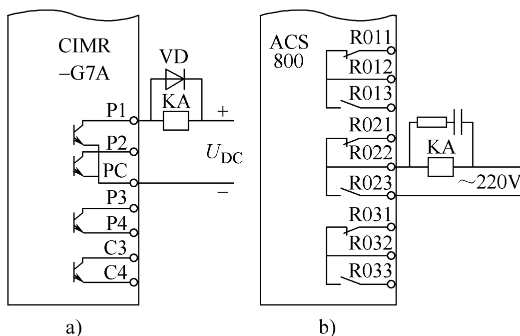


图 5-23　多功能输出端子的应用
a）晶体管输出　b）继电器输出

国产的变频器则往往两种方式都有。

使用时，在多数情况下，可以用一个中间继电器 KA 来取出信号。在晶体管输出时，也可以通过光耦合管取出信号。

问题 29　“频率到达”和“频率一致”有些什么区别？

两种功能都是说明变频器的输出频率是否到达某一水平的信号。但在“到达水平”的设定方式上则有所区别，说明如下：

1. 频率到达　指变频器的输出频率 f_X 是否已经到达由给定信号给定的频率 f_G，如图 5-24a 所示。图中，Δf 为允许误差范围。当 $f_X \geqslant f_G \pm \Delta f$ 时，输出端子（如 Y1）将处于“ON”（导通）状态；当 $f_X \leqslant f_G \pm \Delta f$ 时，端子 Y1 处于“OFF”（截止）状态。

2. 频率检测　频率检测与频率到达的区别主要有二：

（1）频率检测并非以给定频率作为检测的依据，而可以任意设定一个频率值 f_{set} 作为检测的依据。当 f_X 到达 f_{set} 时，输出端子（如 Y1）将处于“ON”（导通）状态，如图 5-24b 所示。

（2）当 f_X 从 f_{set} 下降时，可以预置一个滞后频率 f_h，当 $f_X \leqslant f_G - f_h$ 时，端子 Y1 处于“OFF”（截止）状态。

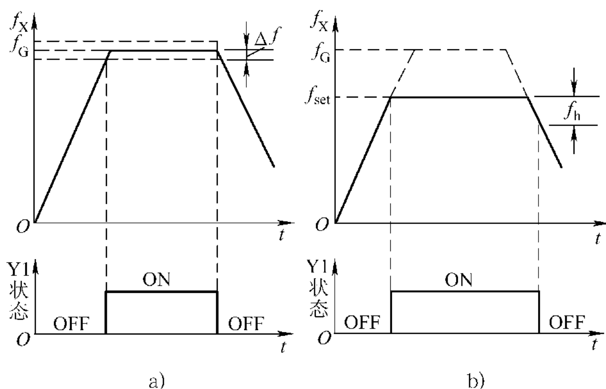


图 5-24　频率到达与频率检测
a）频率到达　b）频率检测

问题 30　外接输出端子有哪些状态输出信号？

主要有：

1. 变频器准备就绪　当变频器的各项准备工作都已经准备就绪，电动机可以起动时，端子为“ON”。

2. 变频器运行中　当变频器正在运行时，端子为“ON”。

3. 零转速运行中　变频器的输出频率为 0Hz，但输出电压不为 0 时，端子为“ON”。

4. 程序运行中　变频器在程序控制的运行过程中，端子为“ON”。

5. 程序运行一个周期结束信号　变频器在程序控制运行一个周期结束时，端子为“ON”。

6. 程序运行换步信号　变频器在每个程序段结束，转入下一步时，端子为“ON”。

7. 程序运行结束　程序控制全部结束时，端子为“ON”。

8. 定时器到达　变频器内部定时器的指定值到达时，端子为“ON”。

9. 设定计数值到达　变频器内部计数器的指定值到达时，端子为“ON”。

10. 过载预置报警　变频器已经处于过载状态，但尚未跳闸时，端子为“ON”。

11. 外部故障停机　变频器因外部故障而停机时，端子为“ON”。

问题 31　某起升机构，希望显示“零速运行”和“停止”，以及“上升”和“下降”，怎样设计其显示电路（变频器为安川 G7A 系列）？

根据上述用户要求，这里提供一个参考电路，如图 5-25 所示。

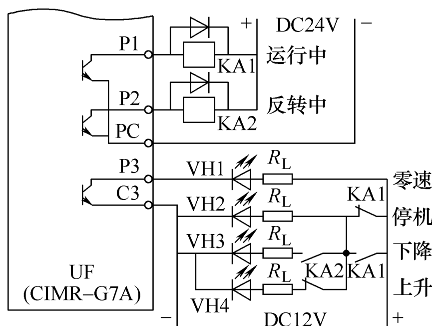


图 5-25　多功能输出的应用实例

由于 G7A 系列变频器的多功能输出中，只有“运行中”的信号，没有停止中的信号；只有“反转中”信号，没有正转中信号。所以，借助中间继电器的动合（常开）触点和动断（常闭）触点来区分。图中，KA1 为“运行中”继电器，KA2 为“反转中”继电器。

将功能码 H2—02 预置为“0”，则输出端子 P1—PC 间在变频器运行过程中导通；

将功能码 H2—03 预置为“1A”，则输出端子 P2—PC 间在反转运行时导通；

将功能码 H2—04 预置为“1”，则输出端子 P3—C3 间在变频器零速运行时导通；

变频器在停机状态下，输出端子 P1 无信号，继电器 KA1 断电，发光二极管 VH2 点亮，显示“停机”；

当变频器运行时，P1—PC 导通，KA1 得电，其动断触点使 VH1 熄灭；动合触点闭合。如正在上升（正转），则 P2 无信号，继电器 KA2 断电，其动断触点使 VH4 点亮；如正在下降（反转），则 P2—PC 导通，KA2 得电，动断触点断开，VH4 熄灭；动合触点闭合，VH3 点亮；

当变频器处于零速状态时，P3—C3 导通，VH1 点亮。

问题 32　搅拌机与输送带间联动，要求输送带工作频率大于 30Hz 时，搅拌机才能起动，如输送带工作频率小于 25Hz，搅拌机必须停机，怎样实现？

搅拌机与传输带之间的联动关系如图 5-26b 所示，图中：

M1——拖动传输带的电动机；

UF1——控制 M1 的变频器；

M2——拖动搅拌机的电动机；

UF2——控制 M2 的变频器；

KA——控制 UF2 是否运行的继电器，其动作由 UF1 的 Y1 输出端控制。

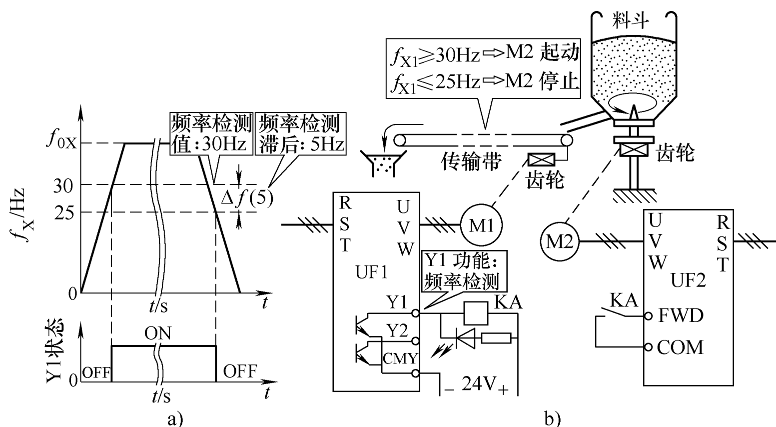


图 5-26　搅拌机与传输带联动控制

a）变频器输出控制端信号　b）搅拌机与传输带示意图

将 Y1 输出端的功能预置为“频率检测”，并将检测频率 f_{set} 预置为 30Hz，滞后频率 f_h 预置为 5Hz，则 Y1 的输出信号如图 a 所示，系统的工作情况如下：

当 UF1 的输出频率上升至 30Hz 以上时，Y1 导通，继电器 KA 得电，其动合触点闭合，UF2 开始起动；如果 UF1 的输出频率下降到 (30 − 5 = 25) Hz 以下时，Y1 截止，KA 断电，UF2 降速并停止。

5.4　变频调速系统的基本控制电路

问题 33　能否通过接通变频器电源来起动电动机？

是否允许在变频器通电的同时起动电动机（上电起动），主要看控制电路接通电源的方式。分以下两种情况：

1. 控制电源独立　部分变频器控制电路的电源是接到主接触器前面，不受主接触器控制的。只要空气断路器 Q 闭合，控制回路就已经通电了，如图 5-27a 所示。就是说，在变频器接通电源之前，控制回路早已做好准备工作了。对于这种变频器，完全可以上电起动。

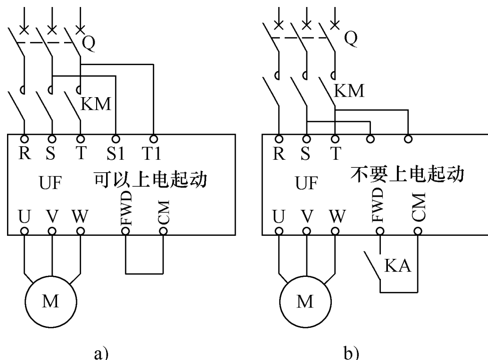


图 5-27　变频器接通电源起动电动机

a）控制电源独立　b）控制电源不独立

2. 控制回路和变频器同时通电　这种变频器在接通电源时，控制回路也刚开始通电，如图 5-27b 所示。而控制回路从接通电源到正常工作，须有两个过渡过程：

（1）开关电源的起振和稳定过程；

（2）CPU 电源的充电过程。因为 CPU 对电源的稳定性要求很高，所用滤波电容的电容量较大，故充电的过渡过程较慢。当电压充电到 CPU 正常工作前的临界状态时，CPU 的工作有可能是紊乱的，并可能导致变频器工作的不正常，严重时甚至损坏变频器。所以，这种变频器一般是不允许上电起动的。

问题 34　怎样正确地控制电动机的起动和停止？

正确控制电动机起动和停止的参考电路如图 5-28 所示。接触器

KM 用于控制变频器接通和断开电源；继电器 KA 用于接通正转（或反转）的控制电路。控制过程应该满足两个要求：

1. 通电对起动的制约　变频器未接通电源之前，正转（或反转）控制电路不能工作，电动机不能起动。图 5-28b 中之接触器触点 KM “L—5” 的作用就在于此：只有当接触器已经得电，变频器通电以后，继电器 KA 才能通电。

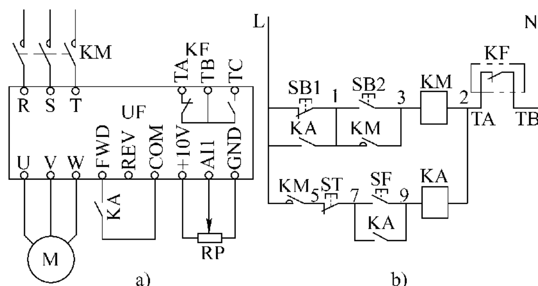


图 5-28　正确控制电动机起动和停止的电路

a）主电路　b）控制电路

2. 运行对断电的制约　在电动机停止运行之前，变频器不能切断电源。图 5-28b 中之继电器 KA 触点 “L—1” 的作用就在于此：只有当继电器已经断电，电动机停机以后，接触器 KM 才能断电。

问题 35　能不能用按钮直接起动电动机？

完全可以。

在可编程控制端内任选一个，如 X1 端，把它预置成自锁控制端子，说明书上常常叫作三线控制端子，当 X1 与 COM 之间处于接通状态时，变频器内部的自锁功能有效，如图 5-29a 所示。起动时，只需按 SF 或 SR 即可，变频器就已经进行了自锁，即使松开按钮，电动机仍保持运行状态。按下 ST，自锁电路被切断，电动机按预置的减速时间减速并停机，其时序如图 b 所示。

自锁控制还有另一种接法，如图 5-30a 所示，变频器自锁功能的是否有效，也取决于 X1 与 COM 之间的通和断。但正、反转却共用一个启动按钮 SF，当预置了自锁控制功能后，原来的反转输入端，变成为电动机旋转方向的切换端子了，当转换开关 SA 断开时为正转，接通时为反转。

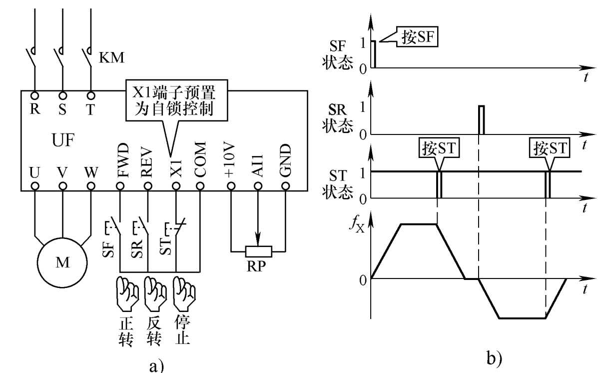


图 5-29　自锁控制之一

a）自锁控制之一　b）开关状态与输出频率

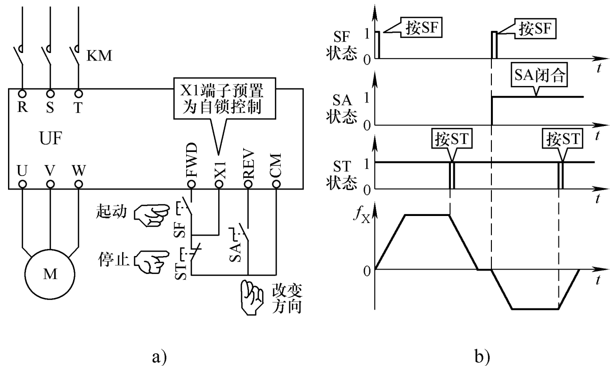


图 5-30　自锁控制之二

a）自锁控制之二　b）开关状态与输出频率

如按下 ST，自锁电路被切断，电动机按预置的减速时间减速并停机。其时序如图 b 所示。

问题 36　怎样更改电动机的旋转方向？

众所周知，任意交换电动机的两根电源线，就可以更改电动机输入侧的相序，从而改变电动机的旋转方向，如图 5-31a 所示。在变频运行的情况下，如何更改呢？

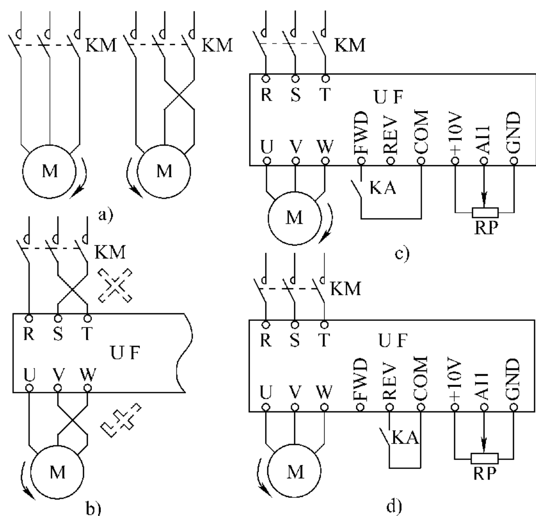


图 5-31　更改电动机的旋转方向

a）工频运行的方法　b）更改变频主电路

c）变频运行正转　d）变频运行反转

首先，更改变频器输入侧的相序是毫无意义的。因为不管输入侧的相序如何，在变频器内经过全波整流后，对输出侧的相序毫无影响。

其次，更改变频器输出侧的相序是可以的，但并不高明。因为主电路的导线一般较粗，更改时比较费事，如图 b 所示。

在变频调速的情况下，更改旋转方向的方法如下：

1. 更改输入控制端的接线　如图 c 和图 d 所示，当“FWD—COM”接通时为正转；如改为“REV—COM”接通，便是反转了。

2. 程序更改　以三肯 SHF 系列变频器为例，功能码 Cd050 用于预置旋转方向，其数据码是：

“0”—正转、反转均可；“1”—只可正转；“2”—只可反转。

如果在预置为“1”的情况下，需要更改方向时，只需将 Cd050 功能重新预置为“2”就可以了。

5. 5 变频运行和工频运行的切换

问题 37 有哪些场合需要进行变频和工频的切换?

一般说来，大致有以下几种情况：

1. 故障切换 有些机械在运行过程中是不允许停机的。对于这些机械，当变频器因发生故障而跳闸时，应能自动切换为工频运行。

2. 程序切换 有的机械根据工艺特点，要求交替进行全速运行和低速运行。从节能的角度出发，全速运行时以切换为工频运行为宜。

3. 运行切换 以供水系统为例，用户为了节省投资，常常采用由一台变频器控制两台或多台（常称为“1 控 X”方式）水泵的控制方式。现以“1 控 2”为例，其工作情况如下：

首先，由“1 号泵”（M1）在变频控制的情况下工作；

当用水量增大，“1 号泵”已经到达上限频率而水压仍偏低时，经过短暂延时，确认需要加泵时，将“1 号泵”切换为工频工作。同时变频器的输出频率迅速降为 0Hz，然后将“2 号泵”（M2）接至变频器，开始变频运行，供水系统处于“一工一变”运行状态。

反之，当用水量减少，水压偏高时，则关闭 1 号泵，仅由 2 号泵进行变频运行。

问题 38 对变频和工频的切换过程有些什么要求?

这个问题需要从切换控制的主电路来进行分析。

1. 切换控制主电路的构成 如图 5-32 所示，各接触器的功用是：

（1）KM1 用于将电源接至变频器的输入端；

（2）KM2 用于将变频器的输出端接至电动机；

（3）KM3 用于将工频电源直接接至电动机。

此外，因为在工频运行时，变频器不可能对电动机的进行过载保护，所以，必须接入热继电器 KH，用于工频运行时的过载保护。

2. 切换的动作顺序 切换时，应先断开 KM2，使电动机脱离变频器。经适当延时后合上 KM3，将电动机接至工频电源。

由于在变频器的输出端是不允许与电源相连接的，因此，接触器 KM2 和 KM3 绝对不允许同时接通，互相间必须有非常可靠的互锁。对此，可以采取的对策有：

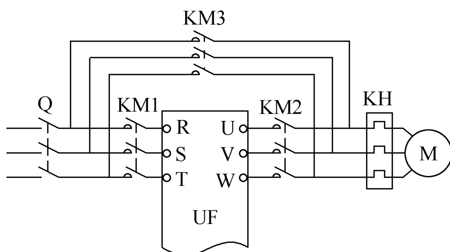


图 5-32　切换控制的主电路

（1）封锁逆变管　在开始切换之前，变频器首先把六个逆变管都封锁。

（2）采用机械互锁　对需要可靠互锁的 KM2 和 KM3 选用具有机械互锁的配对接触器。

（3）预置延迟时间　即从 KM2 断开到 KM3 闭合之间，预置延迟时间，通常称为“切换时间”，用 t_C 表示。

3. 切换控制的基本要求　运行切换应该是从变频 50Hz 切换到工频 50Hz，为此，如切换前电动机的工作频率低于 50Hz 时，切换前应将工作频率提升至基本频率或更高。

此外，当 KM3 闭合，电动机接至工频电源时，电动机的转速不应下降过多，以防止产生较大的冲击电流。一般说来，切换时电动机的转速以不低于额定转速的 70% 为宜。因此，切换时的延时时间应尽量地短一些。

问题 39　变频和工频切换时，在哪些情况下可能出现大电流？

这个问题主要和电动机从变频电源上断开后的过渡过程有关。

1. 自由制动的过渡过程　就是在电动机断电后拖动系统转速的下降过程。

自由制动的时间长短主要和拖动系统的惯性（用飞轮力矩 GD^2 表达）大小有关。在自由制动过程中，拖动系统的转速下降过程称为拖动系统的机械过渡过程。比较典型的例子是风机和水泵，如图 5-33 所示。

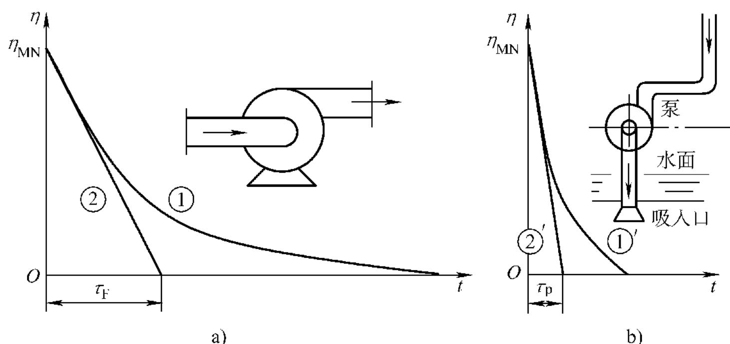


图 5-33　电动机断电后的自由制动过程

a）风机的自由制动过程　b）水泵的自由制动过程

风机的惯性较大，电动机断电后转速下降较慢，如图 a 中之曲线①所示；水泵由于水的位能具有阻止水泵继续旋转的作用，故电动机的惯性将很快被克服，停机往往十分迅速，如图 b 中之曲线①′所示。

转速下降的快慢用时间常数 τ 表示，τ 的含义是转速变化曲线的切线（图 a 中之曲线②和图 b 中之曲线②′）与横坐标交点所对应的时间，如图 a 中之 τ_F 和图 b 中之 τ_P。

2. 电磁反应过渡过程　当电动机切断电源后，其基本状态如下：

（1）定子绕组的自感电动势立即消失　KM2 断开（电动机脱离变频电源）后，电动机定子绕组中的电流及其磁场将立即消失，其能量消耗在 KM2 断开瞬间触点间的电弧上。因此，定子绕组的自感电动势将随着磁场的消失而消失。

（2）转子绕组中存在衰减的直流电流　由于电动机的转子绕组是自成回路的，所以，根据楞次定律，转子绕组的自感电动势将阻止电流的消失。从而，转子绕组中的电流将有一个逐渐衰减的过程，它不再交变，其初始值取决于接触器 KM2 断开瞬间的转子电流值。

与此同时，转子电流将产生一个逐渐衰减的直流磁场。

（3）电动机处于同步发电机状态　转子是直流磁场，定子是三相绕组，这是同步发电机的基本组态。就是说，转子在因为惯性而继续旋转的过程中，其直流磁场被定子绕组所切割，并在定子绕组中产

生感应电动势，如图 5-34a 所示。因为直流磁场是在衰减的，所以，定子电动势也是衰减的，如图 5-34b 中之曲线①所示，曲线②是其切线，时间常数是 τ_E。

3. 切换过程的主要矛盾　一方面，为了在切换瞬间，电动机的转速不要下降太多。所以切换时间应尽量地短；另一方面，缩短了切换时间，在切换瞬间，电磁过渡过程远未结束，存在着定子绕组的电动势与电源电压叠加的问题。

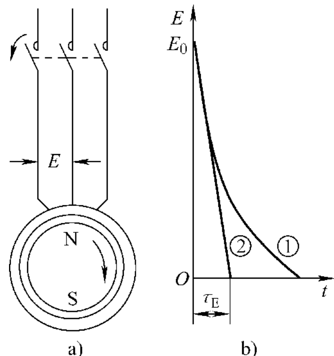


图 5-34　电磁过渡过程

a）电动机状态　b）定子电动势

4. 产生大电流的原因　十分明显，如果在 KM3 闭合（电动机与工频电源接通）的瞬间，电源电压恰好与定子绕组的电动势同相，如图 5-35a 和 c 所示，则切换时将没有附加的冲击电流；反之，如果在 KM3 闭合的瞬间，电源电压恰好与定子绕组的电动势反相，如图 5-35b 和 d 所示，则切换时必将产生很大的冲击电流，在最严重的情况下，冲击电流可接近于直接起动电流的 2 倍。

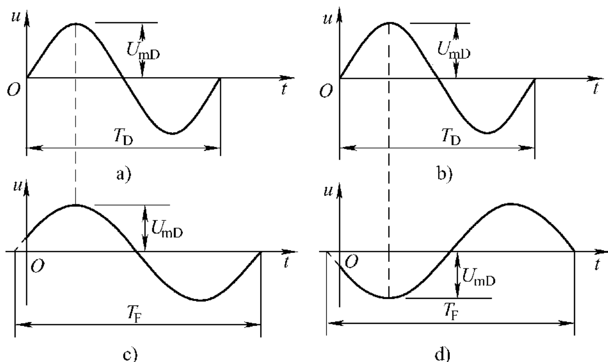


图 5-35　切换瞬间的电压波形

a）、c）电压与电动势同相　b）、d）电压与电动势反相

问题 40　怎样避免切换时的冲击电流？

不同负载的具体措施也不相同。

1. 对于大惯性负载　大惯性负载在自由制动过程中，转速下降较慢，可达数秒或数十秒。而电磁反应过渡过程的时间则很短，只有 1s 左右。因此，当电动机从变频电源上断开，到接通工频电源之间的延时，只要大于 1s，就可以“躲开”电磁过渡过程，也就避免了冲击电流的产生。

2. 对于小惯性负载　如部分水泵，其自由制动的过程与电磁反应过渡过程十分接近，则切换时必须进行相位搜索，以保证在接通工频电源的瞬间，工频电源的电压与定子电动势处于同相位状态（或接近于同相位状态），从而避免冲击电流。

问题 41　水泵切换时怎样防止过大的冲击电流？

这里介绍一种“差频同相”的切换方法，可使切换瞬间最大电流的峰值不超过电动机额定电流的 2 倍（$I'_{M} \leqslant 2I_{MN}$）。

1. 差频同相的概念　由于变频器的输出频率是人为调节的，因此，在变频器的输出频率与电源的工频频率完全相同的情况下，要在短时间内找出两者之间的同相位点是比较困难的。但如果在两者的频率之间保留一定差值（Δf）的情况下“捕捉”同相点，将会容易得多。

由于是在频率不相等的情况下“捕捉”同相点，故称为差频同相。

差频同相的基本出发点是：当变频器的输出频率与电源频率存在差异时，两者的同相点之间将不断地作相对移动，如图 5-36 所示。这个特点，十分有利于“捕捉”到同相点。因此，差频同相的方法可使捕捉同相点的工作更加简单可靠。

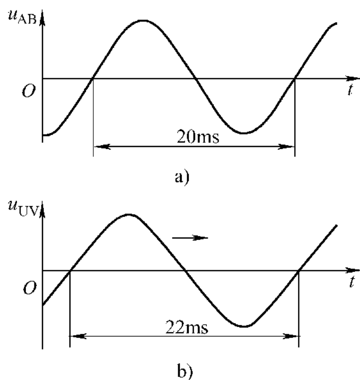


图 5-36　同相点的相对移动
a）电源电压波形　b）变频电压波形

2. 差频同相的实施

（1）合理预置上限频率　如上述，变频器的输出频率与电源

的频率差越小，则同相点之间作相对移动的速度越慢，“捕捉”同相点将越困难。

为此，变频器的上限频率预置为小于 50Hz 的某个数值。这个要求和供水系统的工作并不相悖。事实上，从节能的观点出发，变频供水时，工作在 50Hz 是并不可取的。因为，同样运行在 50Hz 下，变频运行比工频运行时的功耗要大一些。所以，把变频器的上限频率预置为 49.5Hz 或稍高一些是合理的选择。

（2）切换的工作过程　当供水系统中变频器的运行频率达到上限频率，并且经过确认时间，确认需要切换时，供水系统将向“自动转换监控器”发出切换指令。“自动转换监控器”在得到指令后立即开始“捕捉”同相点。

当“捕捉”到同相点时，便断开图 5-32 中之 KM2，并在延时 100ms 后，接通 KM3，切换工作即告完成。

3. 关于切换时间（100ms）

（1）转速方面　当 KM2 切断后 100ms 的瞬间，电动机的转速在额定转速的 80% 以上，满足切换转速不低于 70% n_{MN}的要求；

（2）相位方面　一方面，100ms 是电源电压的 5 个整周期；另一方面，在“捕捉”到同相点后，可适当增加一个提前量，使切换瞬间（KM3 闭合的瞬间）十分接近于同相点，如图 5-37 所示。

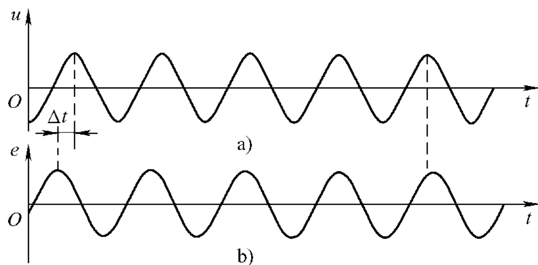


图 5-37　差频时捕捉同相点的提前量

a）电源电压的波形　b）定子电动势的波形

问题 42　能否从工频运行切换至变频运行？

如果变频器本身具有切换功能者，一般都可以实现从工频运行切换至变频运行。切换时，变频器将自动进行频率搜索。

但自行设计切换电路进行切换时，由于无法起动变频器的“频率搜索”功能，故切换时必须有可靠的限流措施，以保护变频器。常用的限流措施便是在变频器和电动机之间接入输出电抗器，如图 5-38 所示。由于在工频运行时接入电抗器会降低功率因数，故电抗器仅在变频运行时接入。

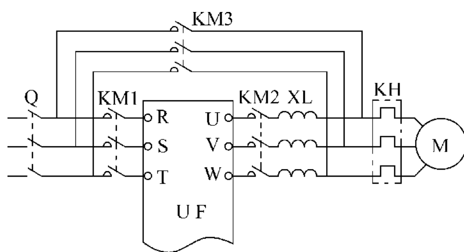


图 5-38　接入限流电抗器

5.6　东芝变频器的切换功能介绍

问题 43　东芝变频器的切换特点有哪些?

东芝 V7 系列变频器的主要电路如图 5-39 所示。要点如下：

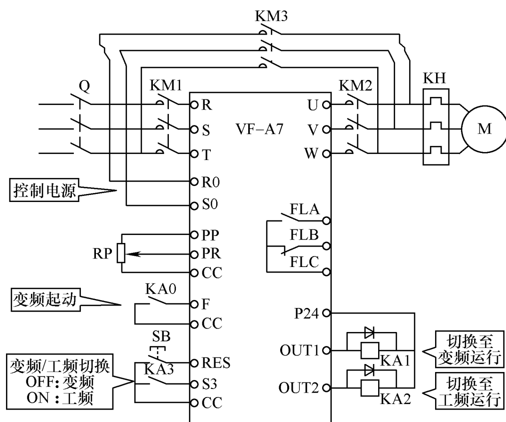


图 5-39　东芝 V7 变频器的特点

（1）控制电路的电源接到接触器主触点的前面，只要空气断路器一闭合，控制电路就开始供电。

（2）端子 F 用于电动机的正转起动，由继电器 KA0 控制。

（3）电动机的转速由电位器 RP 给定。

（4）端子 S3 专门用于切换控制。S3 的状态是和输出控制端子 OUT1 和 OUT2 相联系的：

当继电器 KA3 失电，S3 和 CC 之间处于“OFF”（断开）状态时，拖动系统将变频运行。与此同时，输出端子 OUT1“ON”，外接继电器 KA1 得电；而 OUT2“OFF”，外接继电器 KA2 失电。

问题 44　东芝变频器怎样起动电动机？

首先，接通空气断路器 Q，变频器的控制电路接通电源，内部的开关电源开始工作。

因为 KA3 处于断开状态，S3 无信号，输出端子 OUT1 有信号，继电器 KA1 得电，接触器 KM2 得电，使电动机与变频器相接，准备变频运行。其后的操作过程是：

1. 变频器通电　按下 SF1→KM1“ON”→变频器接通电源。

2. 电动机起动　按下 SF0→KA0“ON”→输入端 F“ON”→电动机起动，变频运行。

3. 转速调节

调节电位器 RP→调节变频器的输出频率→调节了电动机的转速。

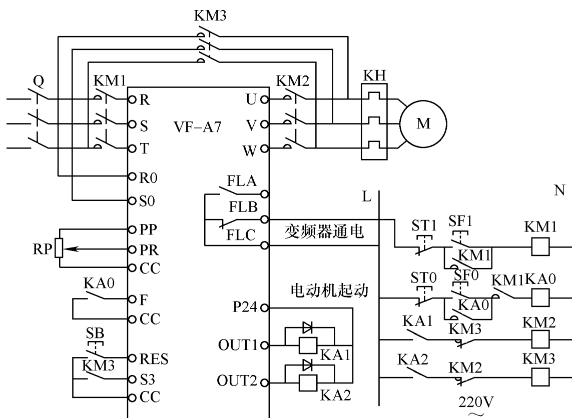


图 5-40　东芝变频器的起动

问题 45　东芝变频器怎样从变频运行切换到工频运行?

假设拖动系统已经处于变频运行的状态，今欲把电动机切换到工频电源上去。切换过程如下：

按下 SF3 →KA3 得电

→输入端子 S3 得到信号

→变频器的输出频率上升至基本频率 f_B

→延时 t_1，等待电动机的转速跟上来

→OUT1“OFF”→KA1“OFF”→KM2“OFF”

电动机脱离变频器。

→OUT2“ON”→KA2“ON”→KM3“ON”

电动机与工频电源相接，转为工频运行。

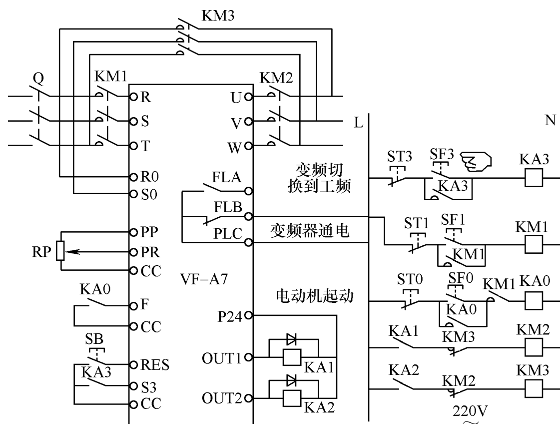


图 5-41　由变频运行切换到工频运行

这里，很重要的一个问题是，因为在切换前，电动机的工作频率是不定的。如果直接切换为工频，则不可能满足在电动机切换为工频运行时，其转速在额定转速的 70% 以上。

为此，当输入端子 S3 得到信号时，变频器首先把输出频率上升到基本频率，开始“等待延时”，等待电动机的转速跟上来。

延时结束后，首先令 OUT1“OFF”，KA1 和 KM2 相继失电，电

动机脱离变频器，开始自由制动。

与此同时，变频器开始“切换延时”，待切换延时结束时，OUT2“ON”，KA2 和 KM3 相继得电，电动机接入工频电源，开始工频运行。

上述切换过程，是变频器内部已经设置好了的，其中的等待延时（t_1）和切换延时（t_2），用户可以根据生产机械的具体情况进行调整。例如，对于容量较大的风机，则 $t_1 = 0.5\text{s}$，$t_2 = 1\text{s}$。而如果是水泵，则 $t_1 = 10\text{ms}$，$t_2 = 120\text{ms}$。

问题 46　东芝变频器在发生故障时怎样切换到工频运行？

变频器的故障跳闸有两种情形：

一种是通过 CPU 对实测数据和基准数据进行比较，如果超过上限值，则进行保护。对于这一类故障，是允许进行跳闸切换的。方法是，首先将功能码 F354 预置为‘1’（跳闸自动切换）。这样，当变频器跳闸时，故障继电器是动作的，但逆变器件将不封锁，使变频器的输出频率可以上升到基本频率，完成切换程序。

从电路上说，只需把变频器内部的故障继电器 FL 的动合（常开）触点（FLA—FLC）与按钮 SF3 并联即可。则故障继电器 FL 动作后，可以起到和按下 SF3 同样的作用，如图 5-42 所示。

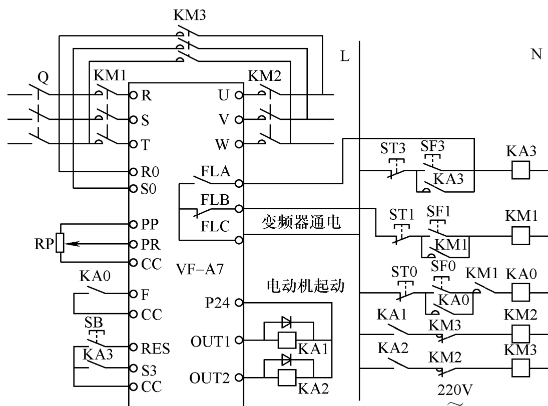


图 5-42　故障切换

另一类故障主要指外部短路故障，是不通过 CPU，而由驱动电路首先进行保护，然后告知 CPU 的。对于这种情况，变频器是不能进行故障切换的。事实上，当外电路短路时，也是不允许进行工频运行的，必须首先排除短路故障。

问题 47　东芝变频器怎样从工频运行切换到变频运行？

当电动机需要从工频运行切换为变频运行时，主要的方法和步骤是：

1. 变频器输出频率　在进行切换前，变频器的输出频率应该上升到基本频率。这时的频率上升，就没有必要按照‘加速时间’逐渐上升了，而可以一下子上升到基本频率。

2. 切换操作　如图 5-43，按下 ST3，使 KA3 断电，S3 端子失去信号，首先令 OUT2“OFF”，KA2 和 KM3 相继断电，电动机脱离工频电源。经过切换延时后，OUT1“ON”，KA1 和 KM2 相继得电，电动机切换到变频器。

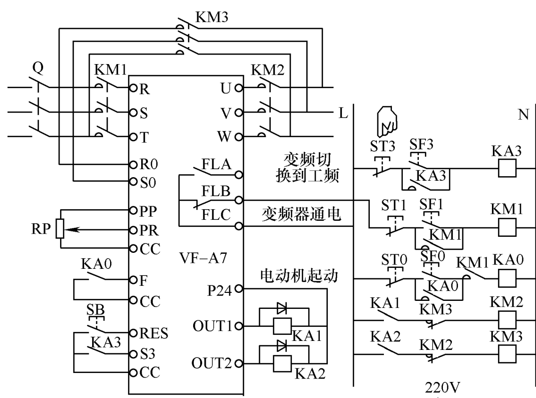


图 5-43　从工频切换到变频

3. 切换后的自动搜索　经过切换延时后，电动机的转速会有所下降，和变频器的输出频率不相吻合。变频器有一个‘自动搜索功能’，能够自动地搜索到与当前电动机的转速相吻合的频率。

5.7　变频器跳闸后的故障切换电路

问题 48　怎样设计直接起动的故障切换电路?

继电器控制的切换电路如图 5-44 所示。为了使变频器切断电源后，其控制电路能够继续起作用，应将变频器内部的控制电源“S1—T1”接至接触器触点的前面。

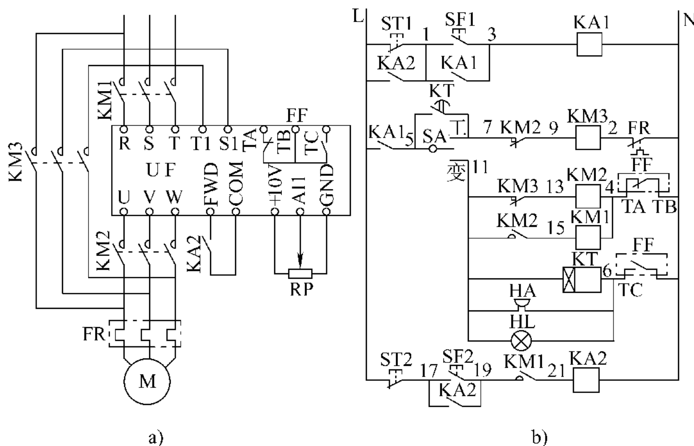


图 5-44　继电器控制的切换电路

a）变频器电路　b）继电器控制电路

此电路可以由人工选择工频运行或变频运行，由三位开关 SA 进行选择。

当 SA 合至“工频运行”方式时，按下起动按钮 SF1，中间继电器 KA1 动作并自锁，进而使接触器 KN3 动作，电动机进入“工频运行”状态。按下停止按钮 ST1，中间继电器 KA1 和接触器 KM3 均断电，电动机停止运行。

当 SA 合至“变频运行”方式时，按下起动按钮 SF1，中间继电器 KA1 动作并自锁，进而使接触器 KM2 动作，将电动机接至变频器的输出端。KM2 动作后，KM1 也动作，将工频电源接到变频器的输入端，并允许电动机起动。

按下 SF2，中间继电器 KA2 动作，变频器的 FWD 与 CM 接通，

电动机开始升速，进入“变频运行”状态。KA2 动作后，停止按钮 ST1 将失去作用，以防止直接通过切断变频器电源使电动机停机。

在变频运行过程中，如果变频器因故障而跳闸，则：

“TA—TB”断开，接触器 KM2 和 KM1 均断电，变频器和电源之间以及电动机和变频器之间，都被切断；

与此同时，“TB—TC”闭合，一方面，由蜂鸣器 HA 和指示灯 HL 进行声光报警。同时，时间继电器 KT 线圈得电，其触点延时后闭合，使 KM3 动作，电动机进入工频运行状态。

操作人员发现后，应将选择开关 SA 旋至“工频运行”位。这时，声光报警停止，并使时间继电器断电。

在变频调速正常运行时，如按下 ST2，则 KA2 断电，变频器的 FWD 与 CM 之间断开，电动机减速并停止。

问题 49　怎样设计自耦变压器减压起动的故障切换电路？

容量较大的电动机用于工频电源时，大多具有降压起动环节。自耦变压器降压起动是常用的方法之一，在配用了变频器后的故障切换电路，如图 5-45 所示，控制电路的工作过程如下：

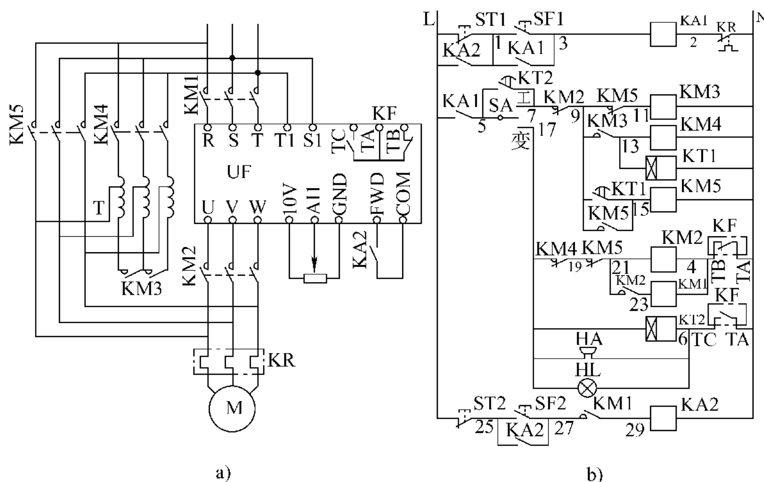


图 5-45　具有自耦变压器降压起动装置的切换电路

a）主电路　b）控制电路

1. 直接工频运行　将切换开关 SA 旋至“工”（“工频运行”）位→SA（5—7）接通。

按起动按钮 SF1→继电器 KA1 得电，这时：

KA1（1—3）闭合→KA1 自锁。

KA1（L—5）闭合→接触器 KM3 得电，这时：

KM3 主触点闭合→自耦变压器接成 Y 形；

KM3（9—13）闭合→接触器 KM4 和时间继电器 KT1 同时得电，这时：

KM4 主触点闭合→自耦变压器接通电源→电动机开始降压起动；

KM4（17—19）断开，防止变频器接通电源。

KT1（9—15）延时后闭合→接触器 KM5 得电，这时：

KM5 主触点闭合→电动机直接接工频电源；

KM5（9—15）闭合→KM5 自锁；

KM5（9—11）断开→接触器 KM3、KM4 和时间继电器 KA1 相继断电。

KM5（19—21）断开→防止变频器接通电源。

停机时，按停止按钮 ST1→继电器 KA1 失电→接触器 KM5 失电→电动机停止。

2. 变频运行　将切换开关 SA 旋至“变”（“变频运行”）位→SA（5—17）接通。

（1）变频器接通电源　按起动按钮 SF1→继电器 KA1 得电，这时：

KA1（1—3）闭合→KA1 自锁；

KA1（L—5）闭合→接触器 KM2 得电，这时：

KM2 主触点闭合→将电动机接至变频器；

KM2（21—23）闭合→接触器 KM1 得电，这时：

KM1 主触点闭合→变频器接通电源；

KM1（27—29）闭合→允许 KA2 工作。

（2）电动机变频起动　按起动按钮 SF2→继电器 KA2 得电，这时：

KA2（25—27）闭合→KA2 自锁；

KA2（FWD—COM）闭合→电动机起动并升速至给定值；

KA2（L—1）闭合→保证电动机在未停机的情况下，变频器不能切断电源。

停机时，先按停止按钮 ST2，使电动机降速并停止；然后按 ST1，使变频器切断电源。

3. 故障切换

（1）切换过程　当变频器发生故障时，其故障输出继电器 KF 动作，这时：

KF（4—N）断开→接触器 KM2 和 KM1 断电→电动机与变频器脱开，变频器断电。

KF（6—N）闭合→蜂鸣器 HA 和指示灯 HL 进行声光报警。与此同时：

时间继电器 KT2 得电→KT2（5—7）延时后闭合→KM3 得电→开始在工频下降压起动，具体过程如上述。

操作人员在得到报警信号后，要做的第一件事情，是将切换开关 SA 旋至“工频运行”位置，这时：

SA（5—17）断开→时间继电器 KT2 断电，同时，声光报警停止。

（2）时间继电器的延时时间

1）KT1 的延时时间　KT1 是用于决定起动过程中的降压时间，应根据拖动系统的惯性大小来决定其时间长短。

2）KT2 的延时时间　KT2 是用于决定将变频运行切换至工频运行时的延时时间，由于风机的惯性较大，故延时时间以大于 2s 为宜。

问题 50　怎样设计 Y-Δ 起动的故障切换电路？

如图 5-46 所示，控制电路的工作过程如下：

1. 直接工频运行　将切换开关 SA 旋至“工”（“工频运行”）位→SA（5—7）接通。

按起动按钮 SF1→继电器 KA1 得电，这时：

KA1（1—3）闭合→KA1 自锁；

KA1（L—5）闭合→接触器 KM3 和时间继电器 KT1 同时得电。

KM3 主触点闭合→电动机绕组接成 Y 形。

KM3（17—19）断开→防止变频器接通电源；

KM3（9—11）闭合→接触器 KM5 得电，这时：

KM5 主触点闭合→电动机接通工频电源→开始在 Y 形接法下减压起动；

KM5（9—11）闭合，KM5 自锁。

KM5（19—21）断开→防止变频器接通电源。

KT1（4—N）延时后断开→KM3 断电→电动机绕组解除 Y 形接法。

KT1（9—15）延时后闭合→接触器 KM4 得电，这时：

KM4 主触点闭合→电动机绕组接成 Δ 形，继续起动；

KM4（9—15）闭合→KM4 自锁；

KM4（9—13）断开→使接触器 KM3 不能通电，同时，时间继电器 KT1 断电。

停机时，按停止按钮 ST1→继电器 KA1 失电→接触器 KM5 失电→电动机停止。

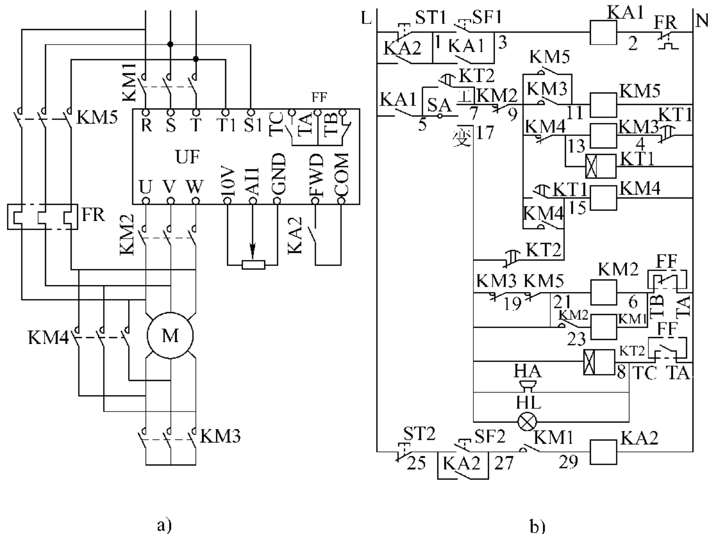


图 5-46　具有 Y-Δ 减压起动装置的切换电路

a）主电路　b）控制电路

2. 变频运行　将切换开关 SA 旋至“变”（“变频运行”）位→SA（5—17）接通。

（1）变频器接通电源　按起动按钮 SF1→继电器 KA1 得电，这时：

KA1（1—3）闭合→KA1 自锁；

KA1（L—5）闭合→接触器 KM4 和 KM2 同时得电，这时：

KM4 主触点闭合→将电动机绕组接成 Δ 形；

KM2 主触点闭合→将电动机接至变频器；

KM2（21—23）闭合→接触器 KM1 得电，这时：

KM1 主触点闭合→变频器接通电源；

KM1（27—29）闭合→允许 KA2 工作。

（2）电动机变频起动　按起动按钮 SF2→继电器 KA2 得电，这时

KA2（25—27）闭合→KA2 自锁；

KA2（FWD—COM）闭合→电动机起动并升速至给定值；

KA2（L—1）闭合→保证电动机在未停机的情况下，变频器不能切断电源。

停机时，先按停止按钮 ST2，使电动机降速并停止；然后按 ST1，使变频器切断电源。

3. 故障切换

（1）切换过程　当变频器发生故障时，其故障输出继电器 FF 动作，这时：

KF（6—N）断开→接触器 KM2 和 KM1 断电→电动机与变频器脱开，变频器断电。

KF（8—N）闭合→蜂鸣器 HA 和指示灯 HL 进行声光报警。与此同时，时间继电器 KT2 得电，这时：

KT2（17—15）延时后断开→KM4 失电→电动机解除 Δ 形接法；

KT2（5—7）延时后闭合→KM3 得电→开始在工频下降压起动，具体过程如上述。

操作人员在得到报警信号后，要做的第一件事情，是将切换开关 SA 旋至“工频运行”位置，这时：

SA（5—17）断开→时间继电器 KT2 断电，同时，声光报警停止。

（2）时间继电器的延时时间

1）KT1 的延时时间　KT1 是用于决定起动过程中的降压时间，

应根据拖动系统的惯性大小来决定其时间长短。

2）KT2 的延时时间　KT2 是用于决定将变频运行切换至工频运行时的延时时间，由于风机的惯性较大，故延时时间以大于 2s 为宜。

5.8　变频器的程序控制

问题 51　某脱水机，要求低速运行 3min 后又分别用中速和高速各脱水 2min，各转速段都要有指示灯指示，怎样实现?

根据用户要求，作出运行程序如图 5-47 所示。共分三个程序段：

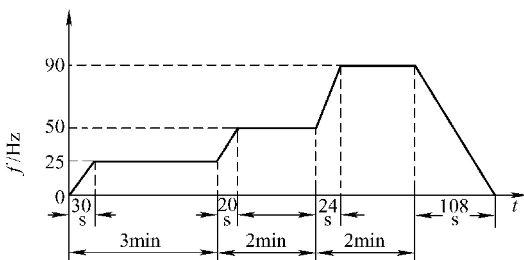


图 5-47　甩干机程序

第一程序段：甩干机内是刚洗过的衣物，由于浸满了水，负荷很重。起动时加速应缓慢些，故：

加速时间：预置为 60s；

运行频率：根据用户要求，预置为 25Hz；

运行时间（包括加速时间）：预置为 3min。

第二程序段：经过 3min 的低速甩干后，负荷减轻了许多，故：

加速时间：预置为 40s；

运行频率：根据用户要求，预置为 50Hz；

运行时间（包括加速时间）：预置为 2min。

第三程序段：又经过 2min 的中速甩干后，负荷又减轻了许多，故：

加速时间：预置为 30s；

运行频率：根据用户要求，预置为 90Hz；

运行时间（包括加速时间）：预置为 2min。

以选用艾默生 TD3000 系列变频器为例，上述程序的功能预置见表 5-4。

表 5-4 衣物甩干程序

功能码	功能名称	预置数据码	说明
F8.00	PLC 运行方式选择	1	选择“单循环”，即循环一周后停止
F8.01	计时单位	0	以秒为计时单位
F8.02	阶段 1 动作选择	0 01	（第 1 挡转速）、正转、以加速时间 2 加速
F8.03	阶段 1 运行时间	180	运行时间为 180s，即 3min
F8.04	阶段 2 动作选择	0 10	（第 2 挡转速）、正转、以加速时间 3 加速
F8.05	阶段 2 运行时间	120	运行时间为 120s，即 2min
F8.06	阶段 3 动作选择	0 11	（第 3 挡转速）、正转、以加速时间 4 加速
F8.07	阶段 3 运行时间	120	运行时间为 120s，即 2min
F8.08	阶段 4 动作选择	0 01	（第 4 挡转速）、正转、以减速时间 2 减速
F8.09	阶段 4 运行时间	110	运行时间为 110s，即减速至 0Hz 所需时间
F2.18	加速时间 2	60	加速至 25Hz 的时间为 30s
F2.19	减速时间 2	120	从 90Hz 减速至 0Hz 所需时间为 108s
F2.20	加速时间 3	40	从 25Hz 加速至 50Hz 所需时间为 20s
F2.22	加速时间 4	30	从 50Hz 加速至 90Hz 所需时间为 24s
F2.24	第 1 挡运行频率	25	
F2.25	第 2 挡运行频率	50	
F2.26	第 3 挡运行频率	90	
F2.27	第 4 挡运行频率	0	

问题 52 某搅拌装置的要求如下：先以 45Hz 正转运行 30min，再以 35Hz 反转运行 20min，每次改变方向前应先将转速降低至 10Hz 运行 1min，并发出准备检测的指示，然后停止运行 1min，由操作人员进行检测。如此循环不已，直至按下停止运行的按钮，怎样实现？

根据用户要求，作出运行程序如图 5-48 所示。

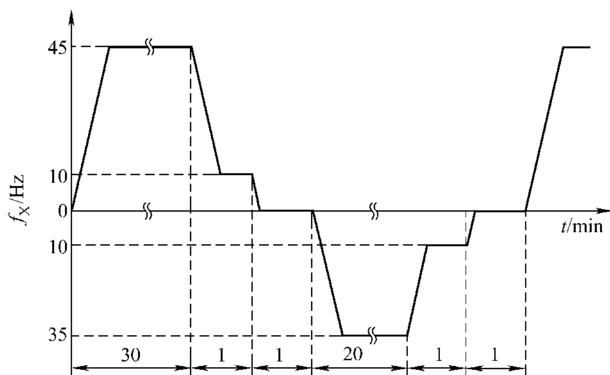


图 5-48　搅拌机程序

第一程序段
加速时间：预置为 20s；
运行频率：根据用户要求，预置为正转 45Hz；
运行时间（包括加速时间）：预置为 30min。
第一程序段
减速时间：预置为 20s；
运行频率：根据用户要求，预置为正转 10Hz；
运行时间（包括加速时间）：预置为 1min。
第三程序段
加速时间：预置为 20s；
运行频率：根据用户要求，预置为 0Hz；
运行时间（包括加速时间）：预置为 1min。
第四程序段
减速时间：预置为 20s；
运行频率：根据用户要求，预置为反转 35Hz；
运行时间（包括加速时间）：预置为 20min。
第五程序段
减速时间：预置为 20s；
运行频率：根据用户要求，预置为反转 10Hz；

运行时间（包括加速时间）：预置为 1min。

第六程序段

减速时间：预置为 20s；

运行频率：根据用户要求，预置为 0Hz；

运行时间（包括加速时间）：预置为 1min。

功能预置与表 5-4 类似。

低速指示采用频率检测功能，如图 5-49 所示。

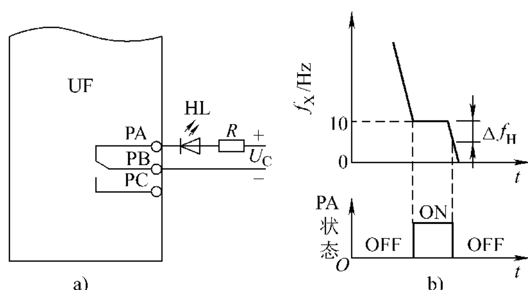


图 5-49 搅拌机的低速指示

a）电路图 b）工作状态

将 F5. 11 功能预置为“5”，则继电器输出端子“PA—PB—PC”为频率检测功能；

将 F0. 07 预置为 50Hz，则最大输出频率为 50Hz；

将 F5. 15 功能预置为“20. 0”，则频率检测值为最大频率的 20. 0%，即 10Hz。这样，当变频器的输出频率超过 10Hz 时，常开触点“PC—PB”闭合，而常闭触点：“PA—PB”则断开，发光二极管 HL 熄灭；而当输出频率 $f_X \leq 10$Hz 时，“PA—PB”闭合，HL 点亮；

将 F5. 16 功能预置为“10. 0”，则频率检测的滞后范围为最大频率的 10. 0%，即 5Hz。这样，变频器的输出频率从 10Hz 降到 5Hz 的范围内，指示灯 HL 保持点亮状态。

由于继电器输出触点“PA—PB—PC”可以承受交流 250V 的电压，所以，HL 也可以直接用 220V 的指示灯。

问题 53　某提升机控制示意图如图 5-50 所示。要求：按 SF 低速上升时，碰 SQ2 后加速，碰 SQ3 后又减为低速，碰 SQ4 后停止；按 SR 时低速下降时，SQ3 复位后高速下降，碰 SQ2 复位后又减为低速，SQ1 复位后停止，怎样实现？

这也是一种程序控制，但程序段之间的切换须通过碰撞行程开关（或接近开关）后执行，如图 5-50 所示。实施方法如下：

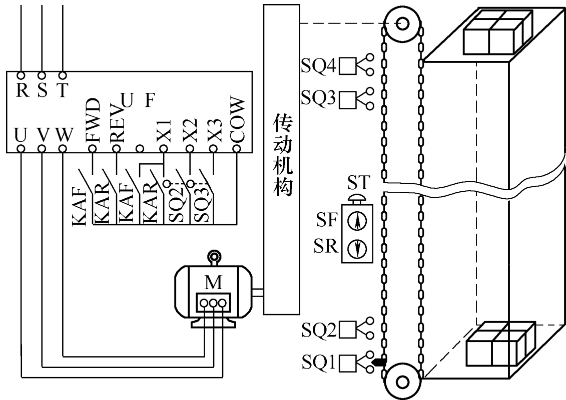
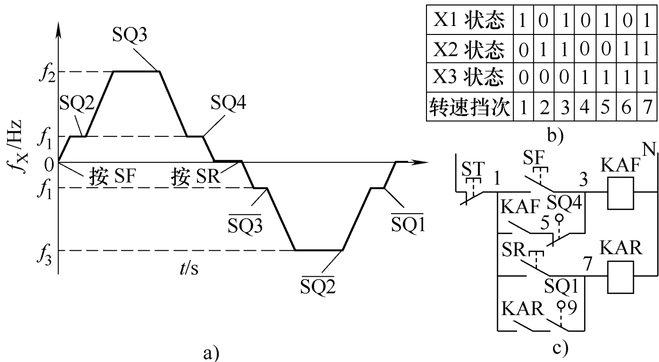


图 5-50　提升机示意图

1. 确定各程序段的数据　程序控制的工况如图 5-51a 所示。根据用户要求，低速频率 $f_1=15\text{Hz}$；上升时的工作频率 $f_2=40\text{Hz}$；高速下降时的频率 $f_3=50\text{Hz}$。



X1 状态	1	0	1	0	1	0	1
X2 状态	0	1	1	0	0	1	1
X3 状态	0	0	0	1	1	1	1
转速挡次	1	2	3	4	5	6	7

图 5-51　提升机的工况及控制电路

a）各程序段的工况　b）多挡速的挡次　c）控制电路

2. 变频器输入端子的状态与转速挡次　（见图 5-51b）。

3. 控制电路　如图 5-51c 所示（不包括变频器通电的控制）。说明如下：

（1）上升过程

1）按 SF→KAF 得电→KAF“FWD—COM”闭合→电动机正转→重物上升；

KAF“X1—COM”闭合→X1 为“1”状态；

KAF（1—5）闭合→KAF 自锁。

这时，多挡转速端子为“001”状态，电动机以第 1 挡转速（f_1）运行，重物慢速上升。

在上升过程中，碰撞 SQ1→SQ1（9—7）闭合→接通 KAR 的自锁回路。

2）碰 SQ2→SQ2“X2—COM”闭合→多挡转速端子为“011”状态，电动机以第 3 挡转速（f_3）运行，重物快速上升。

3）碰 SQ3→SQ3“X3—COM”闭合→多挡转速端子为“111”状态，电动机以第 7 挡转速（与第 1 挡转速相同，也是 f_1）运行，重物又慢速上升。

4）碰 SQ4→SQ4（5—3）断开→KAF 断电→KAF“FWD—COM”断开→停止上升。

（2）下降过程

1）按 SR→KAR 得电→KAR“REV—COM”闭合→电动机反转→重物下降；

KAR“X1—COM”闭合→X1 为“1”状态；

KAR（1—9）闭合→KAR 自锁。

这时，多挡转速端子仍为“111”状态，电动机仍以第 7 挡转速（f_1）运行，重物慢速下降。

在下降过程中，SQ4 复位→SQ4（5—3）闭合→接通 KAF 的自锁回路。

2）SQ3 复位→SQ3“X3—COM”断开→多挡转速端子为“011”状态，电动机以第 3 挡转速（f_2）运行，重物快速下降。

3）SQ2 复位→SQ2“X2—COM”闭合→多挡转速端子为“001”状态，电动机以第 1 挡转速（f_1）运行，重物又慢速下降。

4）SQ1 复位→SQ1（9—7）断开→KAR 断电→KAR“REV—COM”断开→停止下降。

（3）变频器的功能预置　关于多挡转速的功能预置见表 5-5。

表 5-5　提升机变频器的功能预置

功能码	功能名称	预置数据码	说　明
F5. 01	X1 端子功能	1	将端子 X1 预置为多挡转速的低位
F5. 02	X2 端子功能	2	将端子 X2 预置为多挡转速的中间位
F5. 03	X3 端子功能	3	将端子 X3 预置为多挡转速的高位
F2. 24	多段频率 1	50	第 1 挡转速对应的频率是 50Hz
F2. 26	多段频率 3	20	第 3 挡转速对应的频率是 20Hz

5. 9　变频调速的同步控制

问题 54　现欲进行多单元同步控制，各单元可由操作工手动调整，怎样实现？

1. 同步控制概述　多单元同步控制在塑料、印染以及造纸机械中有着广泛的应用，这些机械往往具有许多个传动单元，每个单元都有各自独立的拖动系统。而同时，又要求各单元间被加工物（布匹、纸张等）的运行线速度能够步调一致，即实现同步运行。例如，在图 5-52 所示的控制系统中，要求：

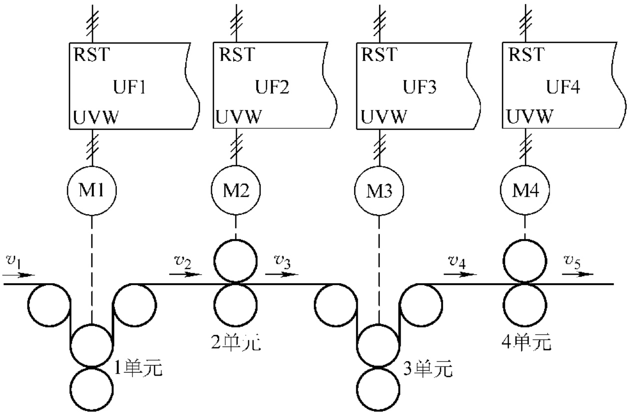


图 5-52　同步控制示例

$$v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5$$

式中，v_1、v_2、v_3、v_4 和 v_5 是各单元被加工物的线速度。

2. 同步运行的控制要求

（1）统调　各单元要能够同时升速和降速。统调是根据主令单元（通常是 1 单元）对转速的要求来进行调节的。

（2）局部微调　当操作人员发现某单元的线速度不同步时，可以进行微调（人工干预）。微调时，该单元以后的各单元的转速必须同时升降或降速，而不必逐个地进行。

例如，当 2 单元需要调节时，则 2 ~ 4 单元同时升降或降速；当 3 单元需要调节时，则 3 ~ 4 单元同时升降或降速。

（3）单独微调　在检修和调试阶段，或者遇到特殊情况时，又必须能够对每个单元的转速单独地进行微调。

3. 控制电路示例　以四个单元的同步为例，其控制电路如图 5-53 所示。

（1）统调　统调通过按钮开关 SB1R（升速）和 SB1D（降速）来进行。

按下 SB1R，光电耦合管 VB11、VB21、VB31 和 VB41 的二极管部分同时导通，它们的光敏三极管部分使变频器 UF1、UF2、UF3 和 UF4 的升速端子 X1 同时得到信号，各单元电动机同时升速；

按下 SB1D，光电耦合管 VB12、VB22、VB32 和 VB42 的二极管部分同时导通，它们的光敏三极管部分使变频器 UF1、UF2、UF3 和 UF4 的降速端子 X2 同时得到信号，各电动机同时降速。

（2）局部微调　2 ~ 4 单元由按钮开关 SB2R（升速）和 SB2D（降速）来进行微调，3 ~ 4 单元由按钮开关 SB3R（升速）和 SB3D（降速）来进行微调。今说明如下：

2 ~ 4 单元微调：

按下 SB2R，光电耦合管 VB23、VB33 和 VB43 的二极管部分同时导通，它们的光敏三极管部分使变频器 UF2、UF3 和 UF4 的升速端子 X1 同时得到信号，电动机 M2、M3 和 M4 同时升速；

按下 SB2D，光电耦合管 VB24、VB34 和 VB44 的二极管部分同时导通，它们的光敏三极管部分使变频器 UF2、UF3 和 UF4 的降速端子 X2 同时得到信号，电动机 M2、M3 和 M4 同时降速。

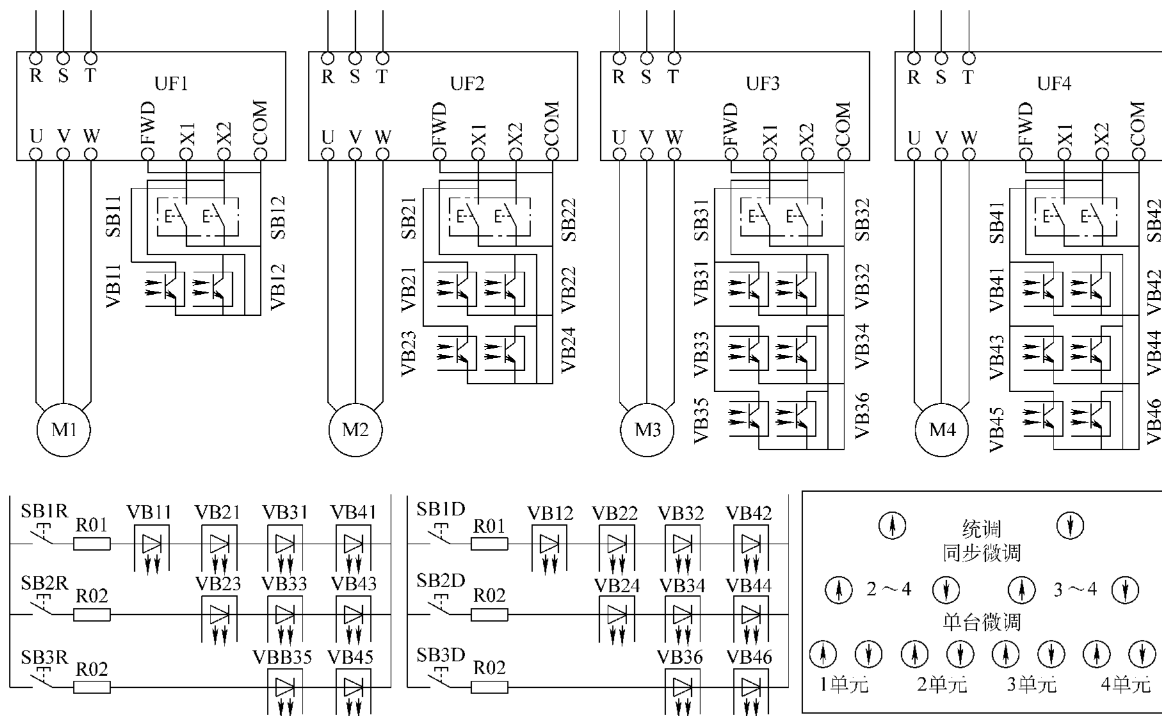


图 5-53　光电耦合管控制四单元同步系统

3 ~4 单元微调：

按下 SB3R，光电耦合管 VB35、VB45 的二极管部分同时导通，它们的光敏三极管部分使变频器 UF3 和 UF4 的升速端子 X1 同时得到信号，电动机 M3 和 M4 同时升速；

按下 SB3D，光电耦合管 VB36、VB46 的二极管部分同时导通，它们的光敏三极管部分使变频器 UF3 和 UF4 的降速端子 X2 同时得到信号，电动机 M3 和 M4 同时降速。

（3）单台微调　单台微调分别由按钮开关 SB11、SB12（1 单元）、SB21、SB22（2 单元）、SB31、SB32（3 单元）和 SB41、SB42（4 单元）来进行。今以 3 单元微调为例，说明如下：

按下 SB31，则变频器 UF3 的升速端子 X1 得到信号，电动机 M3 升速；

按下 SB32，则变频器 UF3 的降速端子 X2 得到信号，电动机 M3 降速。

操作面板如图 5-53 的右下方所示。

问题 55　某印染机共有 6 个单元，都配置了变频调速系统，要求自动同步运行，如何实现？

所谓自动同步运行，是指各单元因“步调”不一致所需要的微调，应该是自动进行的。这种自动微调，通常是通过变频器的辅助给定来实现的。

各种变频器都设置了多个频率给定端，如果有两个以上的给定信号输入时，其中必有一个是主给定信号，其余的为辅助给定信号。辅助给定信号与主给定信号可以相加，也可以相减（多数情况是相减），通过功能预置来决定。

1. 给定电路的电源　由可调直流电源提供。该电源有三个输出端：+5V、0V、−5V。正端和负端的电压可通过电位器 RP0 同步调节。

2. 同步信号的取出　印染机械大都采用调节辊法，如图 5-54 所示。通常，调节辊与可变电阻器 RP_1 的活动端相联。为了使可变电阻不易磨损，较老的机械上采用容量较大的磁盘变阻器。近年来，已有无触点电位器问世，则以采用无触点电位器为宜。

把电位器的两个固定端接到可调直流电源的正、负两端，即可从

电位器的活动端取出同步信号，该同步信号可以是正信号，也可以是负信号。

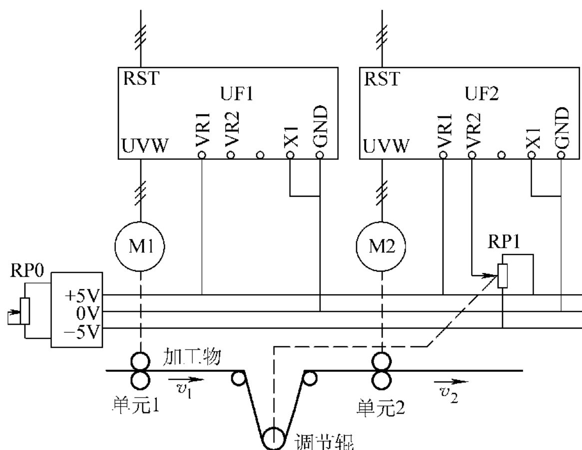


图 5-54　自动同步控制

3. 电路特点

（1）统调信号　将各变频器的主要给定端 VR1—GND 都接至可调直流电源的 +5V 和 0V 之间。当调节电位器 RP_0 时，各变频器的主给定信号同时改变，从而实现了统调。

（2）各单元的微调　与各调节辊相联的电位器活动端取出的信号接至各变频器的辅助给定信号端 VR2。通过功能预置，使 VR1 的信号与 VR2 的信号相减。单元 1 是主令单元，不需要进行微调。

4. 工作过程　以单元 1 和单元 2 之间的同步为例，说明如下：

如 $v_2 > v_1$，调节辊上移，同步信号向电源的“+”端偏移，则变频器 UF2 的合成给定信号 X_Σ 减小，单元 2 的转速将下降；

如 $v_2 < v_1$，调节辊下移，同步信号向电源的“−”端偏移，则变频器 UF2 的合成给定信号 X_Σ 增大，单元 2 的转速将上升。

5.10　变频器与 PLC 的配合

问题 56　PLC 内的电源配置是怎样的？

所用 PLC，以三菱 FX2 系列为例。

如图 5-55 所示，当外部电源（这里以交流 220V 为例）接入后，内部的电源变换装置将产生若干组直流电源：

1. +24V 电源　用于作为输入电路的电源，也可作为外接传感器的电源（见输入电路部分）。

2. 5V 和 12V 电源　用于作为 PLC 和扩展配件相关部分的共同电源。

3. 接地　PLC 的接地端十分重要，必须良好接地。尤其是和变频器一起使用时，如果接地不合要求，可能因受变频器的干扰而无法工作。

4. 外接器件　在电源电路中，应接入一个 PLC 专用的电源开关 SA1。此外，虽然 PLC 内部已经有一个熔断器了，但通常在外部电源电路中，仍应接入熔断器 FU。

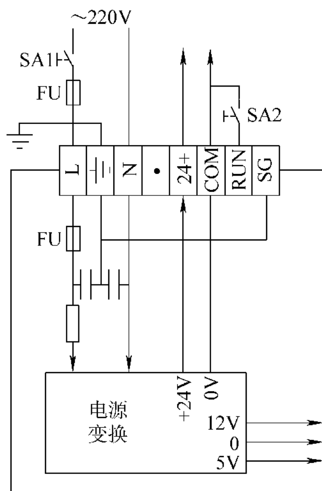


图 5-55　PLC 的电源电路

在“运行端”RUN 和公共端 COM 之间，应接入运行开关 SA2。PLC 只有在 SA2 闭合后才开始工作。

问题 57　PLC 是怎样输入控制信号的？

PLC 的信号输入电路的大致状况如图 5-56 所示，主要特点如下：

1. 信号输入端的结构　信号输入端的文字符号是 X，以 8 进制方式排序，分别是：

X0、X1、X2、X3、…X7、X10、X11、…

信号输入的公共端只有一个，符号是 COM。

2. 输入信号　一般都是开关信号，如按钮开关 SB、接触器触点 KM 等。与内部的 24V 电源、光电耦合管 VP 及限流电阻等构成回路，由光电耦合管 VP 接受信号。

当输入信号由传感器或接近开关给出时，PLC 可以提供 24V 电源。

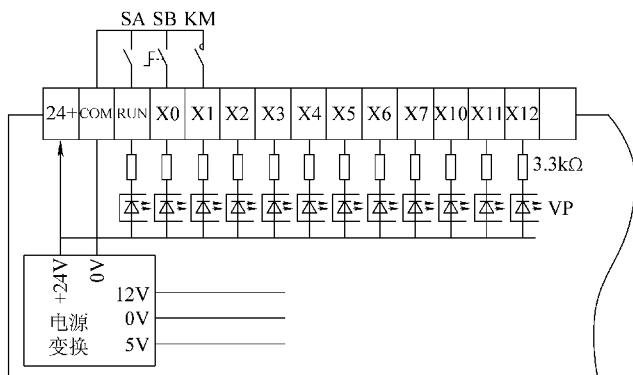


图 5-56　PLC 的信号输入电路

问题 58　PLC 是怎样输出控制信号的?

PLC 的输出信号也是开关量，通常有三种类型：

1. 继电器输出型　其输出器件是继电器触点，是用得较多的一种，其主要特点有：

（1）可以用在交流 220V 电路中，也可以用在低压（≤30V）直流电路中；

（2）触点的容量相对较大。在低压直流电路中，每个输出点的电流可达 2A；在交流电路中，每个输出点的容量是：感性负载为 80VA，电阻性负载为 100W。

（3）开路时无漏电流。

2. 晶闸管输出型　其输出器件是双向晶闸管。它只能用在交流电路中，容量相对较小，在 220V 电路中：感性负载为 30VA，电阻性负载为每点 0. 8A。此外，开路时有漏电流，在 220V 的情况下，漏电流为 2mA。

3. 晶体管输出型　其输出器件是晶体管，它只能用在低压直流电路中。每点的允许电流是 0. 5A，在 DC30V 时，漏电流为 0. 1mA。

下面的实例都采用继电器输出方式。

由于继电器输出既可用在交流电路中，也可用在直流电路中，所以，其输出端常分成若干组，每组有自己的公共端，各组之间互相绝缘。图 5-57 中，Y0、Y1、Y2、Y3 为一组，公共端是 COM1；Y4、

Y5、Y6、Y7 为另一组，公共端是 COM2。因此，各组在组成输出电路时，电压的类别和等级都可以是不同的。

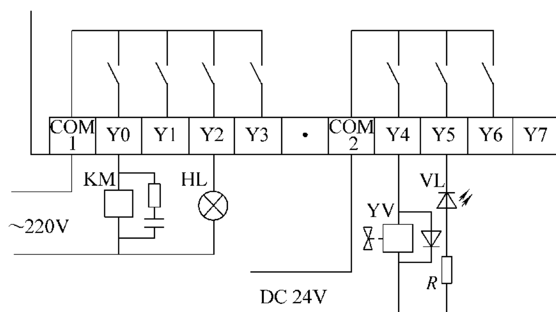


图 5-57　PLC 的信号输出电路

由于 PLC 输出电路中，开关器件的容量较小，且一个损坏，影响全局，故 PLC 的输出电路必须充分注意使用时的可靠性。为此，当输出端接感性负载（如接触器或继电器线圈等）时，必须并联吸收反电动势的电路。如为交流电路，应并联阻容吸收电路；如为直流电路，则应反并联一个吸收二极管，如图所示。

问题 59　什么是 PLC 的“软继电器”?

为了使 PLC 的输入和输出信号之间的逻辑关系简单明了，可以假想在 PLC 内部有着各种各样的继电器，这些继电器和人们熟知的电磁继电器的工作特点十分类似，容易掌握。通常，把这种假想的内部继电器称为“软继电器”。

1. 输入继电器　PLC 在得到输入信号后的工作过程，可以等效成如图 5-58b 所示。就是说，图 a 中的光电耦合管通电，可以假想成是内部的继电器线圈得电。从而，其常开触

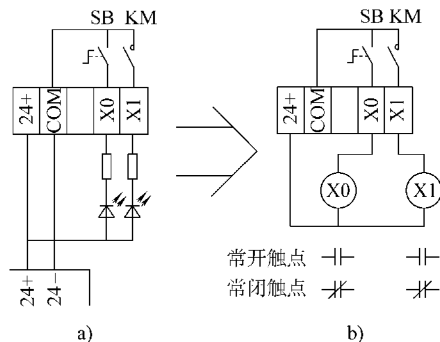


图 5-58　输入继电器

a）输入电路　b）等效继电器电路

点闭合、常闭触点断开。

这种与输入电路等效的继电器称为输入继电器。它具有以下特点：

（1）它只能由外部的输入信号驱动，而不能由内部的逻辑指令来驱动。

（2）其触点不能直接输出，不能用来带动外部负载。

（3）其常开、常闭触点可以多次使用，不受限制，或者说，可以想象成有无数对常开和常闭触点。

2. 输出继电器

如上述，PLC 的输出电路有继电器输出、晶闸管输出和晶体管输出等，但在考虑逻辑关系时，都可以想象成是由继电器输出的，如图 5-59 所示。其主要特点如下：

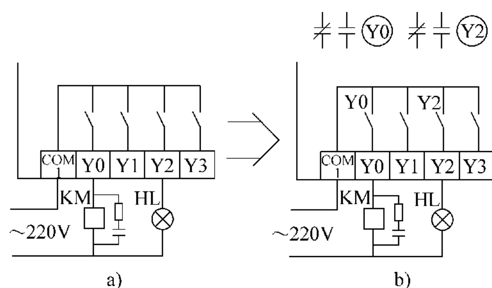


图 5-59　输出继电器

a）输出电路　b）等效输出继电器

（1）直接驱动负载的触点只有一对，并且一定是常开触点。

（2）内部还有无数对常开和常闭触点，用于编程。

（3）一般情况下，输出继电器的“线圈”不宜多处反复使用。

3. 辅助继电器（M）　PLC 内部，设置了许多“辅助继电器”，用 M 表示。其作用类似于中间继电器，用于传递信号。在使用时，须注意以下特点：

（1）既不能直接输入，也不能直接输出。即：既不能直接接受外部信号，也不能用于直接驱动负载。

（2）辅助继电器的数量很多，用途也不完全一致，例如：M0 ~ M499 为通用型继电器；M500 ~ M1023 为断电保持继电器等，须注意阅读说明书。

4. 定时器（T）　相当于时间继电器，用 T 表示。其定时时间由常数 K 决定，K 的基数由定时器的编号决定。如 T0 ~ T199 为 100ms；T200 ~ T245 为 10ms 等。例如，设 T0 的时间常数为 K20，则延时时

间为 2s。

定时器在断电后，所计时间一般不再保持。

5. 计数器（C）　用于计算输入脉冲的次数，用 C 表示。其计数的限值由常数 K 决定，设定范围如 K1 ~ K32767 等。当计数器的计数次数到达限值 K 时，其触点动作。

计数器的计数内容需通过复位指令 RST 来清除。

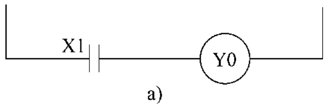
问题 60　怎样编制 PLC 的程序?

1. 梯形图　梯形图是用来描绘输入和输出之间的逻辑关系的，其基本画法与继电器、接触器控制电路十分类似，如图 5-60 所示。

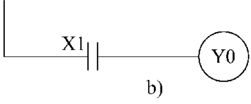
如图所示的逻辑关系是：

X1 得到信号→Y0 的“线圈”得电。

Y0“线圈”的右侧，可以画成“闭合回路”，如图 a 所示；也可以不画，如图 b 所示。



a)



b)

图 5-60　PLC 的梯形图
a）画法之一　b）画法之二

2. 编程语言　梯形图虽然已经清楚地描绘了输入和输出之间的逻辑关系，但不能直接输入到 PLC 中去，须通过编程语言把梯形图的内容输入到 PLC 中。具体地说，编程语言是用 PLC 能够接受的特定符号（通常称为助记符）来描述输入和输出之间逻辑关系的语言。常用的助记符见表 5-6。

表 5-6　常用的助记符及其含义

助记符	指令名称	功能特点	梯形图符号
LD	取信号指令	运行开始（常开触点）	
LDI	取信号“非”指令	运行开始（常闭触点）	
AND	与指令	串联连接（常开触点）	

（续）

助记符	指令名称	功能特点	梯形图符号
ANI	与非指令	串联连接（常闭触点）	
OR	或指令	并联连接（常开触点）	
ORI	或非指令	并联连接（常闭触点）	
ANB	电路块与指令	电路块串联连接	
ORB	电路块或指令	电路块并联连接	
OUT	输出指令	线圈接通（“得电”）	
NOP	空指令	无操作	空格
SET	自锁指令	线圈接通并自锁	SET
RST	复位指令	线圈复位	RST
MPS	进栈指令	进入堆栈	MPS
MRD	读栈指令	堆栈读出	MRD
MPP	出栈指令	堆栈读出并复位	MPP

编制梯形图和编程语言的具体方法在后面的实例中说明。

问题 61　怎样用 PLC 来控制电动机的正转起动和停止？

1. 控制电路

（1）输入侧　如图 5-61 所示，旋钮开关 SA1 用于使 PLC 开始运

行；按钮开关 SB1 用于使接触器 KM 动作；SB2 用于使 KM 释放；旋钮开关 SA2 用于使变频器开始工作；SB3 用于变频器发生故障后的复位。

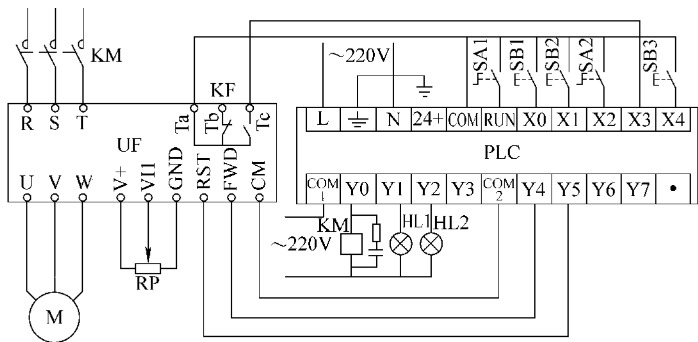


图 5-61　应用 PLC 的正转控制电路

变频器跳闸后的保护触点“Ta—Tc”接至 PLC 的 X3 和 COM 之间，一旦变频器发生故障，PLC 将立即作出反映，使系统停止工作。

（2）输出侧　Y0 与接触器 KM 的线圈相接，用于控制变频器的通电或断电；Y1、Y2 与指示灯 HL1、HL2 相接，分别表示变频器运行及故障报警。

2. 梯形图　正转控制的梯形图如图 5-62 所示。为了便于说明其工作过程，对梯形图中的各“行”进行了编号。

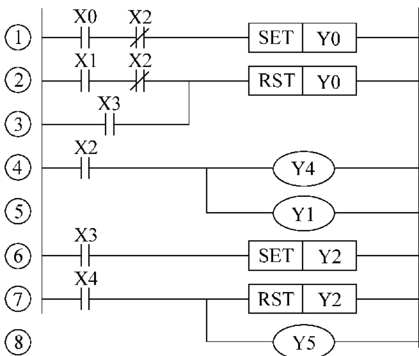


图 5-62　正转控制梯形图

在分析梯形图的工作过程时，我们约定：

继电器“动作”的含义包括：“线圈”得电、动合（常开）触点闭合、动断（常闭）触点断开；

继电器“复位”的含义则反之。

3. 工作程序　图 5-62 的程序（助记符软件）见表 5-7。

表 5-7　图 5-62 的程序

程序号	程序	说明	电路中的对应动作	所在行
变频器接通电源程序				
0	LD　X0	X0 得到信号并动作	按下“起动”按钮 SB1	①
1	ANI　X2	如果 X2 并无信号	SA2 处于断开状态	①
2	SET　Y0	Y0 动作，并自锁	KM 动作，变频器接通电源	①
3	NOP	空指令，修改备用		
变频器切断电源程序				
4	LD　X1	X1 得到信号	按下“停止”按钮 SB2	②
5	ANI　X2	如果 X2 并无信号	SA2 又处于断开状态	②
6	OR　X3	或者 X3 得到信号	变频器因故障而跳闸	③
7	RST　Y0	Y0 复位	KM 复位，变频器断电	②
8	NOP	空指令，修改备用		
变频器运行程序（在上述断电程序并未实施的情况下）				
9	LD　X2	X2 得到信号	SA2 闭合	④
10	OUT　Y4	Y4 动作	变频器 FWD 接通，正转运行	④
11	OUT　Y1	Y1 动作	HL1 亮，说明变频器正在运行	⑤
12	NOP	空指令，修改备用		
变频器跳闸后的故障与复位程序				
13	LD　X3	X3 得到信号	变频器跳闸	⑥
14	SET　Y2	Y2 动作	HL2 亮，说明变频器发生故障	⑥
15	LD　X4	X4 得到信号	故障已经排除，准备复位	⑦
16	RST　Y2	Y2 复位	HL2 熄灭，说明故障已经排除	⑦

（续）

程序号	程序	说明	电路中的对应动作	所在行
变频器跳闸后的故障与复位程序				
17	OUT　Y5	Y5得到信号	变频器RST接通，复位	⑧
18	NOP	空指令，修改备用		
19	NOP	空指令，修改备用		
20	NOP	空指令，修改备用		
21	END	程序结束		

说明：由于PLC的程序写入后，如果发现遗漏，或在修改时需要增加时，是不能任意插入的。所以，在每一小段的最后，通常都要加入1条或多条空指令，以便补充和增加。

问题62　怎样用PLC来控制电动机的正、反转运行？

1. PLC控制的正、反转电路（见图5-63）

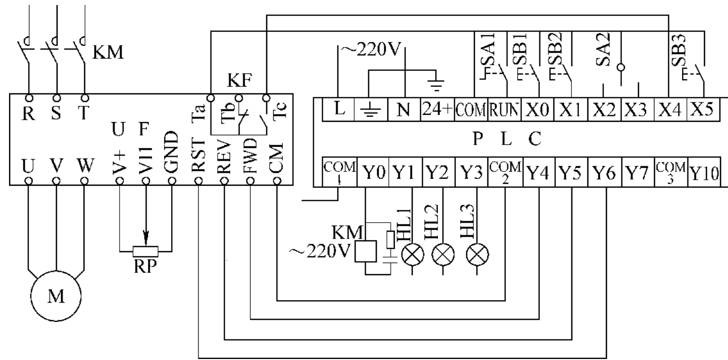


图5-63　应用PLC的正、反转控制电路

（1）输入侧　按钮开关SB1和SB2用于控制变频器接通与切断电源；

三位旋钮开关SA2用于决定电动机的正、反转运行或停止；

X4 接受变频器的跳闸信号；

SB3 用于变频器发生故障后的复位。

（2）输出侧　Y0 与接触器 KM 相接，其动作接受 X0（SB1）和 X1（SB2）的控制；Y1、Y2、Y3 与指示灯 HL1、HL2、HL3 相接，分别指示正转运行、反转运行及变频器故障；Y4 与变频器的正转端 FWD 相接；Y5 与变频器的反转端 REV 相接；Y6 与变频器的复位端相接。

2. 梯形图　输入信号与输出信号之间的逻辑关系如梯形图 5-64 所示。其工作过程如下：

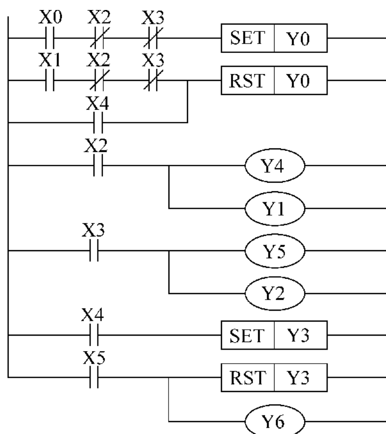


图 5-64　正、反转控制梯形图

按下 SB1，PLC 的输入继电器 X0 得到信号并动作，在电动机并不运行（既不正转，也不反转）的条件下，输出继电器 Y0 动作并保持，接触器 KM 动作，变频器接通电源。

将 SA2 旋至“正转”位，X2 得到信号并动作，输出继电器 Y4 动作，变频器的 FWD 接通，电动机正转起动并运行。同时，Y1 也动作，正转指示灯 HL1 亮。

如 SA2 旋至“反转”位，X3 得到信号并动作，输出继电器 Y5 动作，变频器的 REV 接通，电动机反转起动并运行。同时，Y2 也动作，反转指示灯 HL2 亮。

当电动机正转或反转时，X2 或 X3 的常闭触点断开，使 SB2（从而 X1）不起作用，从而防止了变频器在电动机运行的情况下切断电源。

将 SA2 旋至中间位，则电动机停机，X2、X3 的常闭触点均闭合。如再按 SB2，则 X1 得到信号，使 Y0 复位，KM 断电并复位，变频器脱离电源。

电动机在运行时，如变频器因发生故障而跳闸，则 X4 得到信号，一方面使 Y0 复位，变频器切断电源；同时，Y3 动作，指示灯

HL3 亮，表示变频器正在发生故障。

当变频器的故障修复后，重新起动之前，应先按复位按钮 SB3，使 X5 得到信号，一方面将 Y3 复位，故障指示 HL3 熄灭；另一方面，使 Y6 动作，变频器的 RST 端子得到信号，变频器复位。

问题 63　怎样用 PLC 来进行变频与工频的切换控制？

1. 控制电路（如图 5-65）

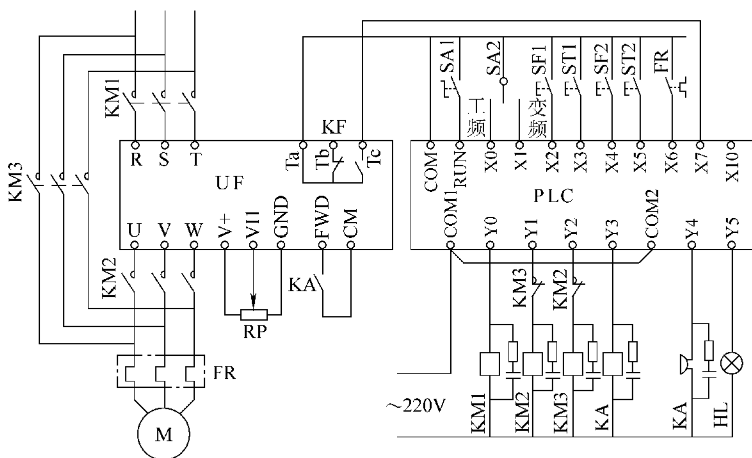


图 5-65　PLC 控制的切换电路

主电路与继电器控制时完全相同(见图 5-44)。这里,为了使 KM2 和 KM3 绝对不能同时接通,除了在 PLC 内部的软件(梯形图)中具有互锁环节外,外部电路中也必须在 KM2 和 KM3 之间进行互锁。

2. 梯形图　PLC 的梯形图如图 5-66 所示，为了叙述方便起见，将梯形图分成五段，分别为 A 段、B 段、C 段、D 段和 E 段，说明如下：

A 段——工频运行段。

首先将选择开关 SA2 旋至“工频运行”位，使输入继电器 X0 动作，为工频运行作好准备。

按起动按钮 SF1，输入继电器 X2 动作，使输出继电器 Y2 动作并保持、从而接触器 KM3 动作，电动机在工频电压下起动并运行。

按停止按钮 ST1，输入继电器 X3 动作，使输出继电器 Y2 “复

位”，从而接触器 KM3 失电，电动机停止运行。

如果电动机过载，热继电器触点 KR 闭合，输入继电器 X6 动作，输出继电器 Y2、接触器 KM3 相继复位，电动机停止运行。

B 段——变频通电段。

首先将选择开关 SA2 旋至“变频运行”位，使输入继电器 X1 动作，为变频运行作好准备。

按起动按钮 SF1，输入继电器 X2 动作，使输出继电器 Y1 动作并保持、一方面使接触器 KM2 动作，将电动机接至变频器的输出端。另一方面，又使输出继电器 Y0 动作，从而接触器 KM1 动作，使变频器接通电源。

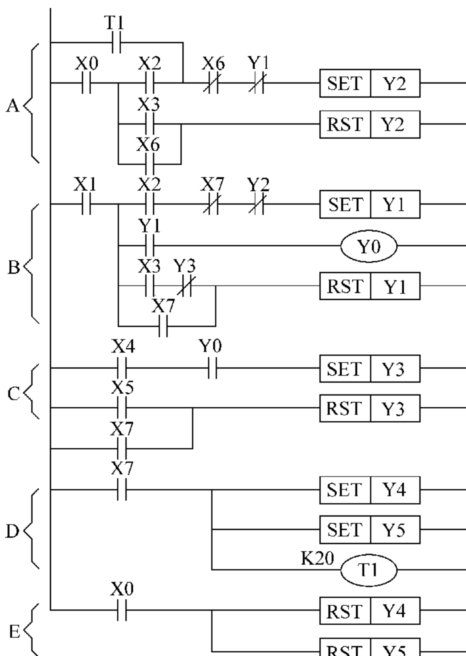


图 5-66 切换控制梯形图

按停止按钮 ST1，输入继电器 X3 动作，在 Y3 未动作或已经复位的前提下，使输出继电器 Y1“复位”，接触器 KM2 复位，切断电动机与变频器之间的联系。同时，输出继电器 Y0 与接触器 KM1 也相继复位，切断变频器的电源。

C 段——变频运行段。

按 SF2，输入继电器 X4 动作，在 Y0 已经动作的前提下，输出继电器 Y3 动作并保持，继电器 KA 动作，变频器的 FWD 接通，电动机升速并运行。同时，Y3 的常闭触点使“停止按钮”ST1 暂时不起作用，防止在电动机运行状态下直接切断变频器的电源。

按 ST2，输入继电器 X5 动作，输出继电器 Y3 复位，继电器 KA 失电，变频器的 FWD 断开，电动机开始降速并停止。

D 段——变频器跳闸段。

如果变频器因故障而跳闸，则输入继电器 X7 动作，一方面使 Y1 和 Y3 复位，从而输出继电器 Y0、接触器 KM2 和 KM1、继电器 KA 也相继复位，变频器停止工作。另一方面，输出继电器 Y4 和 Y5 动作并保持，蜂鸣器 HA 和指示灯 HL 工作，进行声光报警。同时，在 Y1 已经复位的情况下，时间继电器 T1 开始计时，其常开触点延时后闭合，使输出继电器 Y2 动作并保持，电动机进入工频运行状态。

E 段——故障处理段。

报警后，操作人员应立即将 SA 旋至“工频运行”位。这时，输入继电器 X0 动作，一方面使控制系统正式转入工频运行方式；另一方面，使 Y4 和 Y5 复位，停止声光报警。

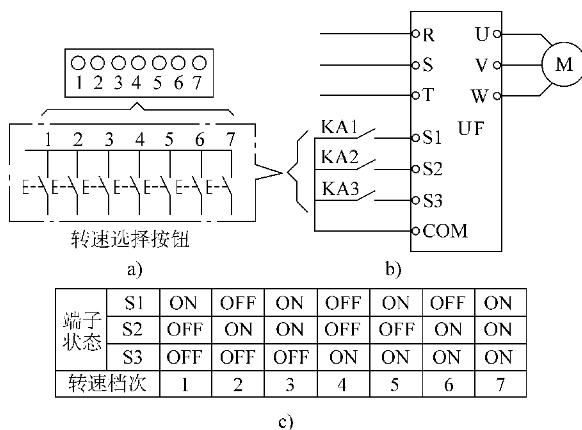
问题 64　怎样设计多挡转速控制电路？

1. 多挡转速的控制特点　变频器在实现多挡转速控制时，需要解决如下的问题：

一方面，变频器每个输出频率的挡次需要由三个输入端的状态来决定；

另一方面，操作人员切换转速所用的开关器件通常为按钮开关或触摸开关，每个挡次只有一个触点。

所以，必须解决好转速选择开关的状态和变频器各控制端状态之间的变换问题，如图 5-67 所示。



端子状态	S1	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
	S2	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	ON
	S3	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON
转速档次		1	2	3	4	5	6	7

c)

图 5-67　多挡转速控制特点

a）操作特点　b）电路特点　c）端子状态表

针对这种情况，通过 PLC 来进行控制是比较方便的。

2. 控制实例　某生产机械有 7 挡转速，通过 7 个选择按钮来进行控制。

（1）控制电路　如图 5-68 所示，说明如下：

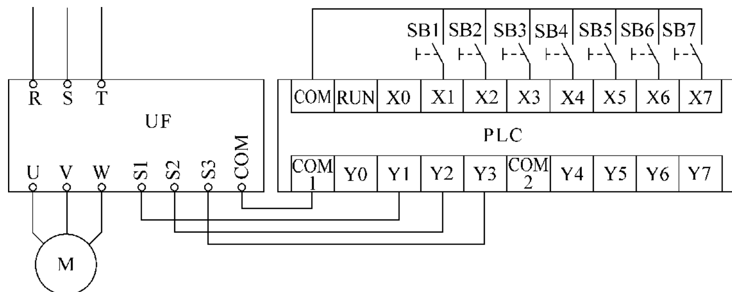


图 5-68　多挡速的 PLC 控制电路

1）PLC 的输入电路　图中 PLC 的输入端 X1 ~ X7 分别与按钮开关 SB1 ~ SB7 相接，用于接受 7 挡转速的信号。

2）PLC 的输出电路　输出端 Y1、Y2、Y3 分别接至变频器的输入控制端的 S1、S2、S3，用于控制 S1、S2 和 S3 的状态。

（2）梯形图之一（SB1 ~ SB7 为非自动复位型按钮开关）　见图 5-69。

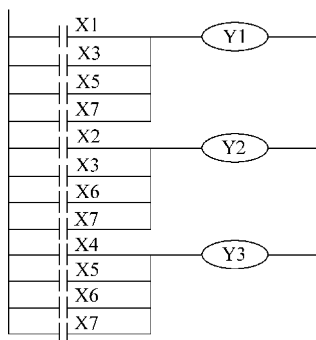


图 5-69　采用非自动复位按钮的梯形图

观察图 5-69 中之端子状态表，可得到如下规律：

S1 在第 1、3、5、7 挡转速时都处于接通状态，故：

PLC 的 X1、X3、X5、X7 中只要有一个得到信号，则 Y1 “动作” →变频器的 S1 端得到信号；

S2 在第 2、3、6、7 挡转速时都处于接通状态，故：

PLC 的 X2、X3、X6、X7 中只要有一个得到信号，则 Y2 “动作” →变频器的 S2 端得到信号；

S3 在第 4、5、6、7 挡转速时都处于接通状态，故：

PLC 的 X4、X5、X6、X7 中只要有一个得到信号，则 Y3“动作”→变频器的 S3 端得到信号。

现以用户选择第 3 挡转速为例，说明其工作情况如下：

按下 SB3→X3“动作”→Y1 和 Y2“动作”→变频器的 S1、S2 端子得到信号，变频器将在第 3 挡转速下运行。

（3）梯形图之二（SB1～SB7 为自动复位型按钮开关）（如图 5-70）。

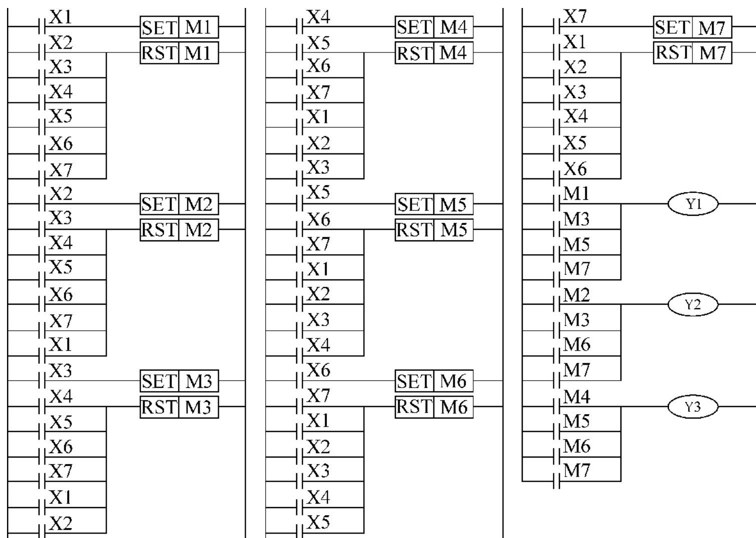


图 5-70　采用自动复位按钮的梯形图

由于 SB1～SB7 采用了自动复位型按钮开关，PLC 输入端子 X1～X7 得到的信号不能保持，故借助 PLC 中的中间继电器 M1～M7，使各转速挡次的信号保持下来。现说明如下：

按下 SB1→X1 得到信号→M1“动作”并自锁，M1 保持第 1 转速的信号。

当按下 SB2～SB7 中任何一个按钮开关（X2～X7 中有一个得到信号）时→M1 释放。

即：M1 仅在选择第 1 挡转速时“动作”。

按下 SB2→X2 得到信号→M2“动作”并自锁，M2 保持第 2 挡

转速的信号。

当按下除 SB2 以外的任何一个按钮开关时→M2 释放。

即：M2 仅在选择第 2 挡转速时“动作”。

以此类推：M3 仅在选择第 3 挡转速时“动作”；M4 仅在选择第 4 挡转速时“动作”；M5 仅在选择第 5 挡转速时“动作”；M6 仅在选择第 6 挡转速时“动作”；M7 仅在选择第 7 挡转速时“动作”。

与图 5-69 类似：

M1、M3、M5、M7 中只要有一个接通，则 Y1“动作”→变频器的 S1 端接通；

M2、M3、M6、M7 中只要有一个接通，则 Y2“动作”→变频器的 S2 端接通；

M4、M5、M6、M7 中只要有一个接通，则 Y3“动作”→变频器的 S3 端接通。

现以用户选择第 5 挡转速为例，说明其工作情况如下：

按下 SB5→X5 得到信号→M5“动作”，同时，如果在此之前 M1、M2、M3、M4、M6、M7 中有处于动作状态的话，都将释放→Y1、Y3“动作”→变频器的 S1、S3 端子接通，变频器将在第 5 挡转速下运行。

第 6 章　变频调速的闭环控制

6.1　闭环控制的概念

问题 1　闭环控制要达到什么目的？

以空气压缩机的恒压控制系统为例，如图 6-1 所示。其基本工作过程是：电动机拖动空气压缩机旋转，使之产生压缩空气，并储存于储气罐中。储气罐中空气压力的大小取决于空气压缩机产生压缩空气的能力（在本系统中，就是取决于电动机的转速 n_M）和用户用气量之间的平衡状况。

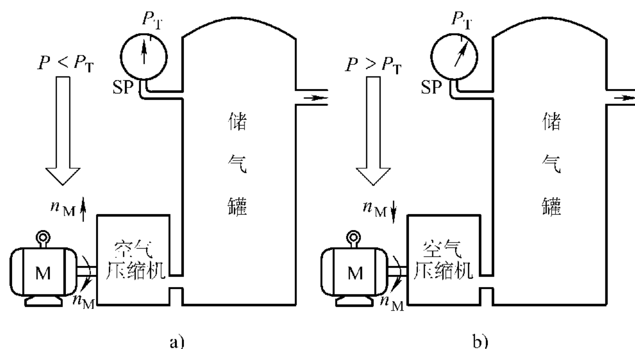


图 6-1　闭环控制的目的

a）压力小于目标值　b）压力大于目标值

为了保证供气质量，要求储气罐的空气压力稳定在某一个数值上。这个数值，是我们的控制目标，称之为目标压力，用 P_T 表示。

恒压控制对于拖动系统的具体要求是：

当用户的用气量增加，储气罐内的实际压力 P_X 小于目标压力 P_T 时，要求电动机加速，使储气罐内的压力上升至目标值，如图 6-1a 所示；

反之，当用户的用气量减少，储气罐内的实际压力 P_X 大于目标压力 P_T 时，要求电动机减速，使储气罐内的压力下降至目标值，如

图 6-1b 所示。

这就是闭环控制所要达到的目的。

问题 2　什么是目标信号？什么是反馈信号？

如图 6-2 所示，与目标压力 P_T 对应的电信号，称为目标信号，用 X_T 表示。在变频器中，X_T 也称目标值或给定值。

与储气罐内的实际压力 P_X 对应的电信号，称为反馈信号，用 X_F 表示。在变频器中，X_F 也称反馈量或当前值。

在恒压控制系统中，要求 X_F 永远无限接近于 X_T：

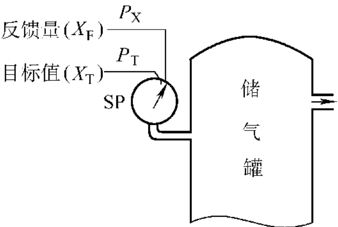


图 6-2　目标信号与反馈信号

$$X_F \approx X_T$$

问题 3　怎样实现被控制的物理量稳定在所希望的数值？

要使拖动系统中的某一个物理量（如上述例子中的压力）稳定在所希望的数值上，变频器的工作过程具有两个方面：

一方面，系统将根据给定的目标信号来控制电动机的运行；

另一方面，又必须把反馈信号反馈到给定电路，使之与目标信号不断地进行比较，并根据比较结果来实时地调整电动机的转速。

所以，变频器必须至少有两种控制信号：目标信号与反馈信号。

仍以空气压缩机的恒压控制系统为例，如图 6-3 所示。

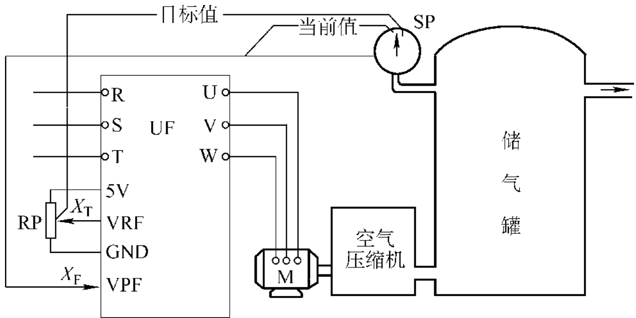


图 6-3　闭环控制系统示意图

1. 闭环控制的信号安排

（1）目标信号　图中，目标信号由电位器RP根据需要人为地给定，接至变频器的给定输入端VRF。

（2）反馈信号　通过传感器SP测得，接至变频器的反馈输入端VPF。

2. 闭环控制的工作过程

（1）空气压力P_X不足→$X_F < X_T$→（$X_T - X_F$）>0

→变频器的输出频率f_X↑

→电动机的转速n_X↑

→空气压力P_X↑，直至P_X与目标压力P_T相等为止；

（2）空气压力P_X过大→$X_F > X_T$→（$X_T - X_F$）<0

→变频器的输出频率f_X↓

→电动机的转速n_X↓

→空气压力P_X↓，直至P_X与目标压力P_T相等为止。

问题4　为什么要加入比例增益？

1. 问题的提出　如上述，变频器的输出频率f_X取决于目标信号X_T和反馈信号X_F的差值（$X_T - X_F$）。那么，能否直接把差值（$X_T - X_F$）作为频率给定信号X_G呢？

如上述，闭环控制的目的是使$X_F \approx X_T$，或（$X_T - X_F$）≈0。如果X_G =（$X_T - X_F$）≈0，则必有变频器的输出频率$f_X \approx 0$，如图6-4所示，空气压缩机将停止运转。显然，这将不可能使储气罐的压力保持稳定。

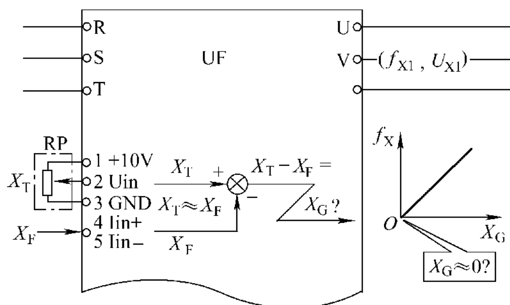


图6-4　出现的问题

在这里，一方面，要求频率给定信号 X_G 与差值（$X_T - X_F$）成正比；另一方面，X_G 又不能直接等于（$X_T - X_F$），这就是问题所在。

2. 比例增益的引入　根据频率给定信号 X_G 与差值（$X_T - X_F$）成正比的特点，如果将差值（$X_T - X_F$）放大 K_P 倍后再作为频率给定信号 X_G，即：

$$X_G = K_P(X_T - X_F) \tag{6-1}$$

式中　X_G——变频器的频率给定信号；

K_P——比例增益（放大倍数）；

X_T——目标信号；

X_F——反馈信号。

如图 6-5 所示。

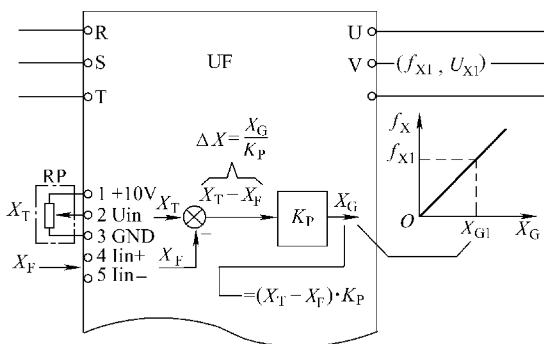


图 6-5　引入比例增益

则：当电动机以某一转速 n_X 运行，其对应的频率和给定信号分别是 f_X 和 X_G 时，反馈信号与目标信号之差为

$$\Delta X = X_T - X_F = \frac{X_G}{K_P} \tag{6-2}$$

式中　ΔX——稳态时的控制误差，也称偏差或静差，即反馈信号与目标信号之差。

由式（6-2）知，比例增益越大，则反馈信号与目标信号之间的偏差越小，储气罐内的压力越稳定。这就是引入比例增益的目的。

问题 5　积分环节和微分环节起什么作用？

1. 问题的提出　如上述，比例增益 K_P 越大，则静差 ε 越小。因

此，为了减小静差，应加大 K_P，如图 6-6a 所示。

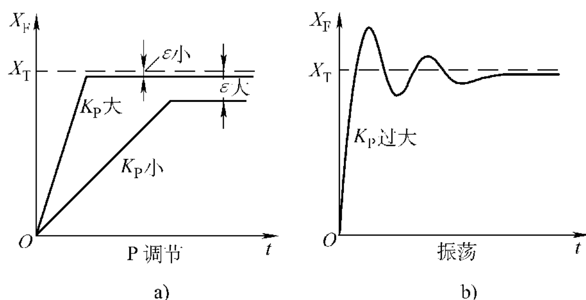


图 6-6　P 调节的结果

a）比例增益的作用　b）K_P 太大的后果

但 K_P 太大了，X_F 和 X_T 稍有差异，变频器的给定信号 X_G 和输出频率 f_X 以及电动机的转速 n_X 都迅速变化。到了（X_T-X_F）≈ 0 时，由于传动系统和控制电路都有惯性，上述变化不能立即停住，形成“超调”，即调过了头。于是又反过来变化，再次超调，形成振荡，如图 6-6b 所示。

2. 解决办法

（1）积分控制　为了消除系统的振荡，引入了积分环节 I，其目的是：

使给定信号 X_G 的变化与乘积 K_P（X_T-X_F）对时间的积分成正比。意思是说，尽管 K_P（X_T-X_F）一下子增大（或减小）了许多，但 X_G 只能在“积分时间”内逐渐地增大（或减小），从而减缓了 X_G 的变化速度，防止了振荡。积分时间越长，X_G 的变化越慢，如图 6-7a 所示。

只要偏差不消除（$X_T-X_F\neq 0$），积分就不停止。所以，积分环节还能有效地消除静差。

但积分时间（I）太长，又会发生当用气量急剧变化时，被控量（压力）难以迅速恢复的情况。

（2）微分控制　微分控制是根据偏差变化率$\frac{d\varepsilon}{dt}$的大小，提前给出一个相应的调节动作，从而缩短了调节时间，克服了因积分时间太

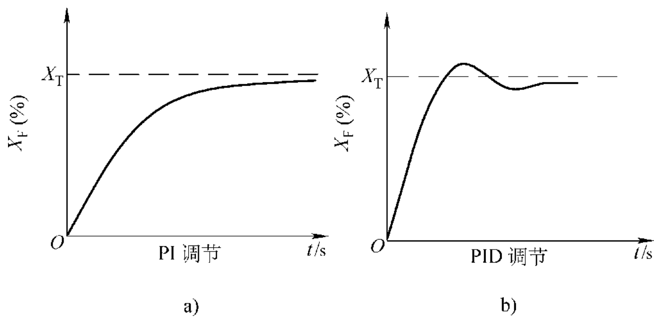


图 6-7　积分与微分环节
a）增加积分环节　b）又增加微分环节

长而使恢复滞后的缺点，如图 6-7b 所示。

6.2　闭环系统的控制逻辑

问题 6　什么是负反馈？

以图 6-8a 所示的空气压缩机恒压控制为例，当压力由于用气量增大而低于目标压力时（$P_X < P_T$），反馈信号下降（$X_F\downarrow$），要求变频器的输出频率上升（$f_X\uparrow$），以提高电动机的转速（$n_X\uparrow$），使储气罐内的压力保持恒定。

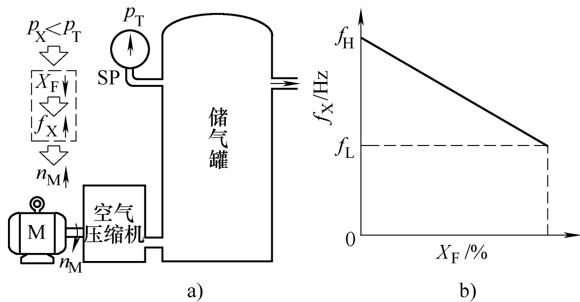


图 6-8　负反馈控制
a）恒压控制　b）控制逻辑

这种变频器的输出频率与反馈量的变化趋势相反的控制方式，称为负反馈，如图 6-8b 所示。

由于闭环控制中，负反馈控制较多，故有的变频器把这种控制逻辑称为正逻辑。

问题 7　什么是正反馈？

以图 6-9a 所示的房间恒温控制为例，当室内温度高于目标温度 ($\theta_X > \theta_T$) 时，反馈信号上升 ($X_F \uparrow$)，要求变频器的输出频率上升 ($f_X \uparrow$)，以提高电动机的转速 ($n_X \uparrow$)，加大冷空气吹入室内的风量，使室内温度保持恒定。

这种变频器的输出频率与反馈量的变化趋势相同的控制方式，称为正反馈，如图 6-9b 所示。有的变频器把这种控制逻辑称为正逻辑。

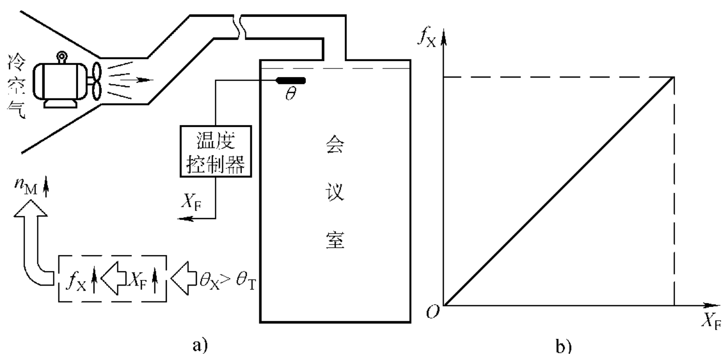


图 6-9　正反馈控制

问题 8　变频器怎样预置反馈逻辑？

各种变频器对于反馈逻辑的称谓很不统一，甚至有类似的称谓，而含义却相反的情形。大体上说，有以下几种：

1. 无反馈逻辑的选择功能　少数变频器未设置反馈逻辑的选择功能，实际上是只有负反馈功能。

2. 有“正”、“负”选择功能　但名称和含义很不一致，见表 6-1。

3. 按偏差 ΔX 的正负选择　选择项目（数据码）通常为“不倒置”或“倒置”。这里：“不倒置”的含义是按正常情况进行，指负反馈；“倒置”的含义是按相反的情况进行，指正反馈。

各种变频器对反馈逻辑选择功能的设置见表 6-1。

表 6-1　各种变频器对反馈逻辑选择功能的设置

变频器型号	功能码	功能含义	数据码及含义
康沃 CVF—G2	H—51	反馈信号特性	0：正特性（正反馈） 1：逆特性（负反馈）
森兰 SB12	F51	反馈极性	0：正极性（负反馈） 1：负极性（正反馈）
英威腾 INVT—G9	6—12	PI 调节方式	0：输出频率与反馈信号成正比（正反馈） 1：输出频率与反馈信号成反比（负反馈）
富士 G11S	H20	PID 模式	0：不动作 1：正动作（正反馈） 2：反动作（负反馈）
三菱 FR—A500	Pr. 128	选择 PID 控制	10：PID 负作用（负反馈） 11：PID 正作用（正反馈）
安川 CIMR—G7A	b5—09	选择 PID 的正反特性	0：PID 输出为正特性（负反馈） 1：PID 输出为反特性（正反馈）
丹佛士 VLT5000	437	工艺 PID 正常/逆向控制	0：正常（负反馈） 1：逆向（正反馈）
瓦萨 CX	2. 23	误差值倒置	0：不倒置（负反馈） 1：倒置（正反馈）

6.3　目标信号和反馈信号的相关功能

问题 9　怎样进行目标值给定？

各种变频器的目标值给定功能不完全一致，大致有以下几种：

1. 自动转换法　多数变频器在预置 PID 功能有效时，其频率给定功能即自动转为目标值给定，如表 6-2 中之安川 CIMR—G7A 系列变频器。

2. 通道选择法　部分变频器则专门设置了选择目标值给定通道的功能，如表 6-2 中之康沃 CVF—G2 系列变频器、森兰 SB12 系列变频器以及瓦萨 CX 系列变频器等。其中，瓦萨 CX 系列变频器还可以用升、降速端子来调整目标值。

表6-2 各种变频器的目标值给定功能

变频器型号	功能码	功能含义	数据码及含义
安川 CIMR—G7A	b5—01 b1—01	选择PID功能是否有效	当通过b5—01选择PID功能有效时，b1—01的各项频率给定通道均转为目标值输入通道
康沃 CVF—G2	H—49	设定通道选择	0：面板电位器 1：面板数字设定 2：外部电压信号1（0～10V） 3：外部电压信号2（－10～10V） 4：外部电流信号 5：外部脉冲信号 6：RS485接口设定
森兰SB12	F47	目标给定方式	0：面板给定 1：外部端子VRF给定 2：外部端子IRF给定
瓦萨CX	2.15	PI控制器参考值信号	0：模拟电压输入（端子2） 1：模拟电流输入（端子4） 2：从面板设定 3：由升、降速功能设定 4：由升、降速功能设定，停机后复位

问题10 反馈信号接到哪里？

各种变频器都有若干个“频率给定输入端”，在这些输入端子中，如果已经确定一个为目标信号的输入通道的话，则其他的输入端子都可以作为反馈信号的输入端，但电压信号和电流信号必须从不同的端子输入，反馈信号的范围可以选择。

比较典型的几种设置方法见表6-3。

表6-3 各种变频器的反馈信号通道

变频器型号	功能码	功能含义	数据码及含义
安川 CIMR—G7A	H3—05	模拟量输入端子A3功能选择	B：PID反馈信号输入通道
	H3—09	电流信号输入端子A2功能选择	

（续）

变频器型号	功能码	功能含义	数据码及含义
康沃 CVF—G2	H—50	反馈通道选择	0：外部电压信号 1（0～10V） 1：电流输入 2：脉冲输入 3：外部电压信号 2（－10～10V）
森兰 SB12	F50	反馈方式	0：模拟电压 0～5V（0～10V） 1：模拟电流 0～20mA 2：模拟电压 1～5V（2～10V） 3：模拟电流 4～20mA
瓦萨 CX	2. 16	PI 控制器实际值输入	0：实际值 1 1：实际值 1＋实际值 2 2：实际值 1－实际值 2 3：实际值 1×实际值 2
	2. 17	实际值 1 的输入	0：无 1：电压输入 2：电流输入
	2. 18	实际值 2 的输入	0：无 1：电压输入 2：电流输入

问题 11　怎样用键盘来预置目标值？

1. 电路特点　用键盘来预置目标值时，变频器的任意一个频率给定端都可以作为反馈信号的输入端，如图 6-10a 所示。图中，压力传感器 SP 由变频器的辅助直流电源供电，其输出的电压信号作为反馈信号 X_F 接至变频器的给定信号输入端 VI1 端。

2. 目标值的预置　如图 6-10b 所示：

（1）按 MODE 键，使变频器由“监控模式”转换为“监控参数查询”模式；

（2）按 ▲ 键或 ▼ 键，将功能码调整为 d—6（PID 设定值）；

（3）按 ENTER 键，读出原有数据，假设为 30. 0；

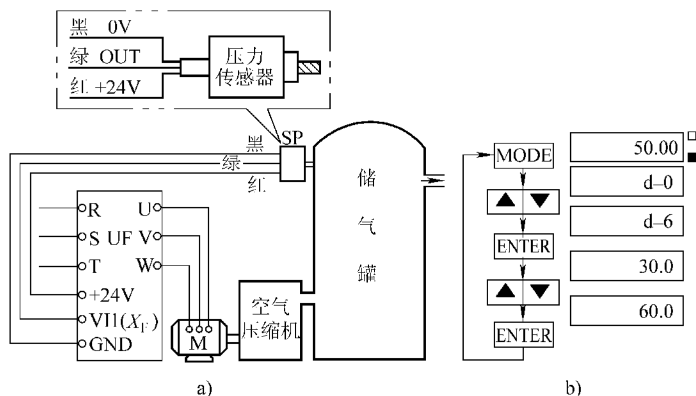


图 6-10　用键盘预置目标值的特点
a）接线特点　b）目标值的调整

（4）按 ▲ 键或 ▼ 键，将数据码调整为要求的目标值，假设为 60.0；

（5）按 ENTER 键，写入新数据。

问题 12　怎样确定目标值的大小？

因为目标信号和反馈信号常常并不是同一种物理量，难以直接进行比较。所以，大多数变频器的目标信号和反馈信号都用传感器（SP）量程的百分数来表示。

例如，要求储气罐内的空气压力保持为 0.6MPa，传感器的输出信号为 4～20mA 的电流信号，则：

当 SP 的量程为 0～1MPa 时，有：

与 0.6MPa 对应的百分数为 60%，对应的信号电流为

$$X_T = [4 + (20 - 4) \times 0.6]\text{mA} = 13.6\text{mA}$$

目标值定为 60%，如图 6-11a 所示；

当 SP 的量程为 0～5MPa 时，有：

与 0.6MPa 对应的百分数为 12%，对应的信号电流为

$$X_T = 4 + (20 - 4) \times 0.12 = 5.92\text{mA}$$

目标值定为 12%，如图 6-11b 所示。

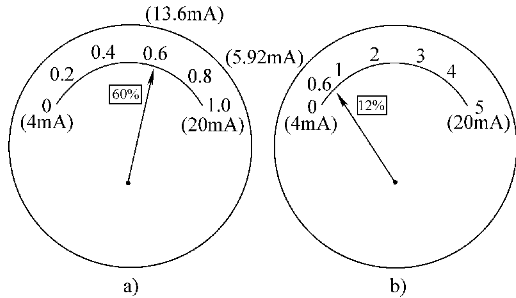


图 6-11　确定目标信号

a）量程为 1MPa　b）量程为 5MPa

6.4　变频器的 PID 功能设置

问题 13　怎样决定变频器的 PID 功能是否有效?

应用变频器的 PID 功能时，必须事先将 PID 功能预置为“有效”。具体方法有两种：

1. 通过功能预置来决定　例如，康沃 CVF—G2 系列变频器中，功能码 H—48 用于预置“内置 PID 控制”，其数据码是：“0”—无 PID 控制；“1”—普通 PID 控制；“2”—恒压供水 PID。

2. 通过外接端子的状态来决定（见图 6-12）

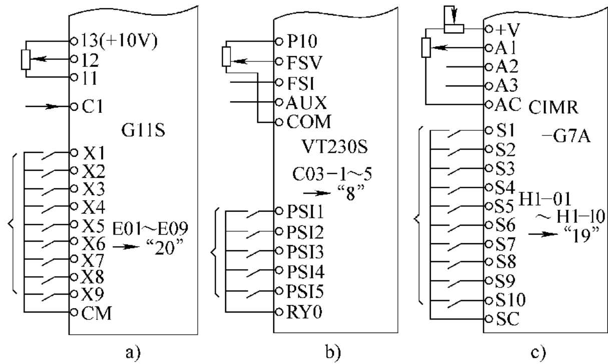


图 6-12　通过外接端子决定 PID 功能是否有效

a）富士 G11S　b）明电 VT230S　c）安川 G7A

图 a 是富士 G11S 系列变频器在多功能输入控制端子 X1 ~ X9 中任选一个，将功能码 E01 ~ E09（与端子 X1 ~ X9 相对应）预置为“20”，则该端子即具有决定 PID 控制是否有效的功能（“ON”—无效；“OFF”—有效）。

图 b 是明电 VT230S 系列变频器在多功能输入控制端子 PSI1 ~ PSI5 中任选一个，将功能码 C03—1 ~ C03—5（与端子 PSI1 ~ PSI5 相对应）预置为“8”，则该端子即具有决定 PID 控制是否有效的功能（“OFF”—无效；“ON”—有效）。

图 c 是安川 CIMR—G7A 系列变频器在多功能输入控制端子 S1 ~ S10 中任选一个，将功能码 H1—01 ~ H1—10（与端子 S1 ~ S10 相对应）预置为“19”，则该端子即具有决定 PID 控制是否有效的功能（“ON”—无效；“OFF”—有效）。

需要说明的是，大部分变频器兼有上述两种预置方式，但也有的变频器只有一种方式。例如，康沃 CVF—G2 系列变频器没有通过外接端子的状态来决定 PID 控制是否有效的功能；而明电 VT230S 系列变频器则不能通过功能预置来决定。

问题 14　变频器的 PID 功能有效时，有哪些功能将发生变化？

当变频器的 PID 功能有效时，下列功能将发生变化：

1. 模拟量输入端　模拟量输入端将不再输入频率给定信号，而输入目标信号或反馈信号。

2. 加、减速时间　变频器预置的加速时间和减速时间将不起作用，电动机的实际加、减速时间将由 P、I、D 的运算结果来决定。

3. 开关量输入端　在开关量输入端中，只有运行信号（RUN 或 FWD）起作用，其他操作信号（如点动等）都将不起作用。

问题 15　反馈信号的滤波时间起什么作用？

因为被测物理量的变送器通常安装在工作现场，而变频器则安装在控制室，两者之间的距离往往较远。因此，反馈信号线往往较长，容易受到干扰。就是说，变频器所得到的反馈信号中，有可能出现一些不规则的干扰信号。

为了防止和削弱干扰信号，变频器在接受反馈信号时，先要对反馈信号进行滤波。滤波时间（也叫采样时间）可以由用户根据现场

的具体情况进行调整。

滤波时间越长，滤波效果越好，但控制系统的灵敏度将降低。反之，如果要求保持较高的灵敏度，则滤波时间应适当地预置得短一些，但滤波效果稍差。

问题 16　PID 输出的滤波时间和反馈信号的滤波时间有什么区别？

如上述，反馈信号的滤波时间主要用于抗干扰。但 PID 输出的滤波时间却和干扰无关。

上面提到，如果 P、I、D 的参数预置不当，有可能使拖动系统发生振荡。万一，拖动系统的振荡频率和机械的固有振荡频率相等或接近，将引起谐振而发生振动。严重时，将损坏机械。设置了 PID 输出的滤波时间，将改变拖动系统的振荡频率，甚至可以消除振荡，也就避免了机械的谐振。

问题 17　如何处理反馈信号的断线故障？

如上述，反馈信号线往往较长，因此也容易受到损伤。为此，各种变频器都设置了一旦反馈信号发生断线故障时，如何应对的功能，见表 6-4。

表 6-4　各种变频器对反馈信号断线时的处理功能

变频器型号	功能码	功能含义	数据码及含义
康沃 CVF—G2	H—60	PID 反馈量断线检测阀值	0.0～20.0%
	H—61	PID 反馈量断线动作选择	0：停机 1：按数字敲定频率运行 2：按上限频率运行 3：按上限频率的一半运行
安川 CIMR—G7A	b5—12	选择 PID 反馈指令丧失是否检出	0：不检出 1：检出时继续运行，故障接点不动作 2：检出时自由滑行，故障接点动作
	b5—13	反馈指令丧失检出值	0～100%

（续）

变频器型号	功能码	功能含义	数据码及含义
安川 CIMR—G7A	b5—14	反馈指令丧失检出时间	0. 0 ~ 25. 5s
瓦萨 CX	2. 19	实际值的最小比例	(-320. 00 ~ +320. 00)%
	2. 20	实际值的最大比例	(-320. 00 ~ +320. 00)%

表 6-4 中，瓦萨 CX 系列变频器只设定反馈信号的上限值和下限值，如果反馈电路断线，反馈信号必在限值之外，变频器将报警或停机。

问题 18　变频器的 PID 功能有效时，有什么变化？

当 PID 功能有效时，变频器的主要变化如下：

1. 给定信号　不论是键盘给定，或是外接给定，所给定的信号不再是频率给定信号，而是目标值给定信号 X_T。

2. 加、减速时间　当 PID 功能有效时，变频器所预置的加速时间和减速时间都不再起作用。其速度的改变仅仅根据 P、I、D 的运算结果来决定。

3. 显示内容　当 PID 功能有效时，显示屏上显示的将是目标信号或反馈信号的百分数。

问题 19　怎样预置和调整 P、I、D 等参数？

1. P、I、D 的预置原则

（1）比例增益 P　一般说来，在初次调试时，P 可按中间偏大值来预置；

（2）积分时间 I　I 的取值与拖动系统的时间常数有关：拖动系统的时间常数较小者，积分时间应短些；反之，拖动系统的时间常数较大者，积分时间应长些。

（3）微分时间 D　D 的取值也和拖动系统的时间常数有关：拖动系统的时间常数较小者，微分时间也应短些；反之，拖动系统的时间常数较大者，微分时间也应长些。

2. P、I、D 的调整　如 P、I、D 预置不当，主要现象和调整方法如下：

（1）被控量在目标值附近振荡　首先加大积分时间 I，如仍有振

荡，可适当减小比例增益 P。

（2）被控量在变化后难以恢复　首先加大比例增益 P，如反应仍较迟缓，可适当减小积分时间 I。如果有 D 功能者，还可以加大微分时间 D。

6.5　PID 的控制运行

问题 20　闭环控制时，PID 调节系统的工作过程是怎样的？

图 6-13 是变频调速恒压供气系统在正常工况下的 PID 调节过程。

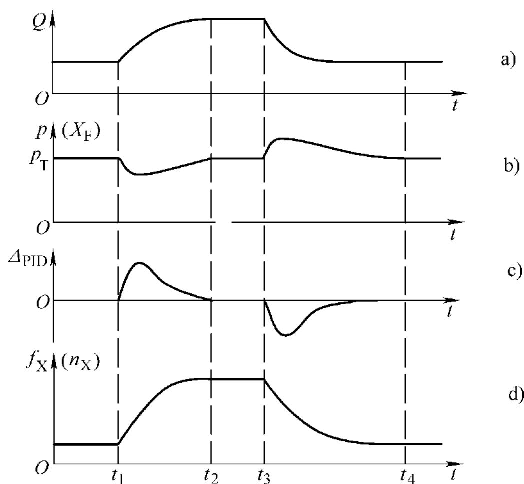


图 6-13　恒压供气的正常工况

a）用气量　b）压力　c）调节量　d）频率

图 a 是用户用气量 Q 的变化情形；图 b 是储气罐的压力 p（与之对应的反馈量是 X_F）的变化情形，由于 PID 调节的结果，它的变化是很小的；图 c 是用气量 Q 发生变化（从而储气罐的压力也变化）时 PID 的调节量 Δ_{PID}，调节量 Δ_{PID} 只是在压力反馈量 X_F 与目标值 X_T 之间有偏差时才出现。在无偏差的情况下，$\Delta_{PID}=0$；图 d 是变频器输出频率 f_X 和电动机转速 n_X 的变化情形。具体工作过程如下：

（1）稳态运行　用户的用气量无变化时，气压 P 稳定而无变化，

反馈信号与目标信号近乎相等（$X_F \approx X_T$），PID 的调节量 Δ_{PID} 为 0，电动机在频率 f_X 下匀速运行，如图 6-13 中之 0 ~ t_1 段；

（2）用气量增加　当用气量增大时，储气罐的压力 P 有所下降，反馈信号 X_F 减小，合成信号（$X_T - X_F$）则增大，PID 产生正的调节量（Δ_{PID} 为“ + ”），变频器的输出频率 f_X 和电动机的转速 n_X 上升，压力回复，如图 6-13 中之 t_1 ~ t_2 段。

当压力 P 由于电动机转速的升高而恢复到目标值时，PID 的调节量减小为 0（$\Delta_{PID} = 0$），变频器的输出频率 f_X 和电动机的转速 n_X 不再上升，空气压力又复恢为目标值，如图 6-13 中之 t_2 ~ t_3 段。

（3）用气量减小　当用气量减少时，储气罐的压力 P 上升，反馈信号 X_F 增大，合成信号（$X_T - X_F$）则减小，PID 产生负的调节量（Δ_{PID} 为“ – ”）。结果是变频器的输出频率 f_X 和电动机的转速 n_X 下降，压力 P 又开始回复，如图 6-13 中之 t_3 ~ t_4 段。

当压力大小由于电动机转速的降低而重又回复到目标值时，系统恢复稳定运行，如图 6-13 中 t_4 以后的情形。

问题 21　闭环控制时，频率显示总在变化是正常现象吗？

闭环控制时，频率显示总在变化是正常现象。如上述，由于用户的用气量或用水量是不断变化的，实际压力也随之变化。为了保持压力恒定，就必须不断地通过调整变频器的输出频率来调节电动机的转速。

所以，当 PID 功能有效时，应该观察被控量（即反馈量，如压力）是否稳定，而并不是看频率是否稳定。

问题 22　某料泵电动机采用了 PID 控制，但振荡范围大，怎么解决？

振荡范围大，说明比例增益可能偏大，而积分时间则可能偏小。应适当减小比例增益或增大积分时间。

首先减小比例增益，以减小振荡范围。然后增大积分时间，以消除振荡；

如果增大积分时间后，反应过于迟缓，则不宜再增大积分时间，而应继续调整比例增益。如果有微分功能者，可增大微分时间 D。

问题 23　系统的压力变化后恢复得太慢，怎么办？

压力变化后恢复太慢，说明积分时间过长，或比例增益太小。

如果原来预置的比例增益和积分时间都预置得较大，则应首先考虑减小积分时间。

如果原来预置的比例增益并不大，则应首先考虑加大比例增益。

如果控制系统有微分环节的话，则可适当增大微分时间。

问题 24　PID 控制系统在运行过程中，被控量有时会发生不规则的变化，怎么办?

被控量发生不规则的变化，说明反馈信号受到了干扰。

如果不规则变化只是偶而发生，则可以通过延长 PID 输出滤波时间来解决。

如果不规则变化经常发生，甚至连续发生，说明干扰严重，应查找干扰源，并设法使反馈信号线远离干扰源，如无法远离，则消除或削弱干扰源。

问题 25　闭环控制与开环控制在运行过程中能够互相切换么?

在图 6-12（问题 13）中，部分变频器是可以通过外接输入端子的状态来决定 PID 功能是否有效的，在这种情况下，是可以通过外接输入端子来对闭环控制与开环控制进行切换的。

瓦萨 CX 系列变频器的情形如图 6-14 所示。其切换用的外接输入端子是固定的，为 16 号端子（DIB6）。当 DIB6 处于“ON”状态（图中的 KA 闭合）时，PI 功能无效。

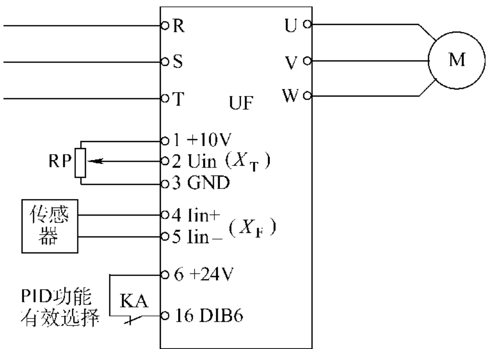


图 6-14　闭环控制与开环控制的切换

6.6　闭环控制的起动问题

问题 26　闭环控制系统在起动过程中为什么容易跳闸？

许多拖动系统在起动前，反馈信号为“0”。和目标信号之间的偏差值 ΔX 很大，由 PID 运算出的调节量 Δ_{PID} 也很大。

由于当 PID 功能“有效”时，变频器的“加速时间”和“减速时间”都将失效，电动机加、减速的快慢只取决于 PID 的调节量 Δ_{PI}。因此，在起动过程中，拖动系统有可能因加速过快而导致“过电流跳闸”。

问题 27　闭环控制时，怎样解决电动机的起动？

针对上述情况，处理方法有以下几种：

1. 在起动过程中通过外接端子切换成开环控制　部分变频器可以通过功能预置，选择一个输入控制端子，具有闭环控制和开环控制的切换功能。则在起动过程中，使变频器处于开环状态，待起动到一定频率后再切换成闭环控制。

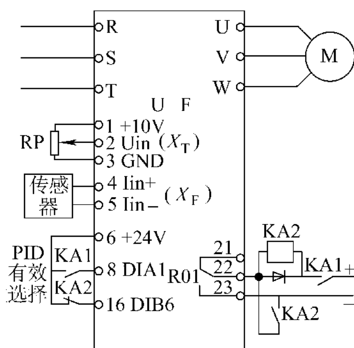


图 6-15　电动机的起动控制

例 1：瓦萨 CX 系列变频器控制方法如图 6-15 所示。

将端子 8（DIA1）预置为“起动/停止”控制端，由继电器 KA1 控制：KA1 闭合时电动机起动，KA1 断开时电动机停止。

将端子 16（DIB6）预置为“PID 有效选择”控制端，由继电器 KA2 控制：KA2 断开，PID 功能有效；KA2 闭合，PID 功能无效。

在外接输出端子中，将端子“21、22、23”预置为“输出频率监控值”（频率到达），则当变频器的输出频率到达预置值后，内部继电器 RO1 动作。

其工作过程是：起动时，KA1 动作，电动机因 DIA1 得到信号而起动，继电器 KA2 处于断电状态，其常闭触点使 PID 功能无效，电

动机的起动过程由加速时间控制；当电动机已经起动起来，变频器的输出频率到达预置的“监控值”时，内部继电器 RO1 动作，输出端子“22—23”闭合，继电器 KA2 线圈得电，其常闭触点断开，PID 功能有效，变频器转为闭环运行。电动机的加、减速由 PID 调节功能进行控制；同时，继电器 KA2 的常开触点闭合，使 KA2 线圈保持通电（自锁）。

例 2：安川 CIMR—G7A 系列变频器　通过功能码 H1—01 ~ H1—10，在外接输入端子中任选一个端子预置为“34”，则“PID 软起动”功能有效，电动机将自行软起动。在此过程中，b5—17 功能将失效。

2. 变频器自动切换　部分变频器设置了专用于 PID 控制时的加、减速功能。举例如下：

（1）安川 CIMR—G7A 系列变频器　预置 PID 加、减速时间：功能码 b5—17 用于预置“PID 指令用加减速时间”。这样，当 PID 功能有效时，其起动时的加、减速时间将由 b5—17 功能独立决定。

（2）丹佛士 VLT5000 系列变频器　由功能码 439 预置“工艺 PID 起动频率”，则变频器在起动时，将按开环运行方式起动，直至上升到“工艺 PID 起动频率”后，才自动转为闭环控制。

6.7　外接 PID 控制器

问题 28　外接 PID 控制器的大致构造如何？

外接 PID 控制器的大致构造如图 6-16 所示。

1. 接线端子

①、②—电源输入端；

③、④—反馈信号输入端；

⑤、⑥—PID 调节信号的输出端；

⑦、⑧、⑨—报警输出端。

2. 面板

（1）显示　可同时显示目标信号（PV）和反馈信号（SV），以利于观察运行状况。

（2）键盘　只有设定键（SET）和增减键（∧和∨）。

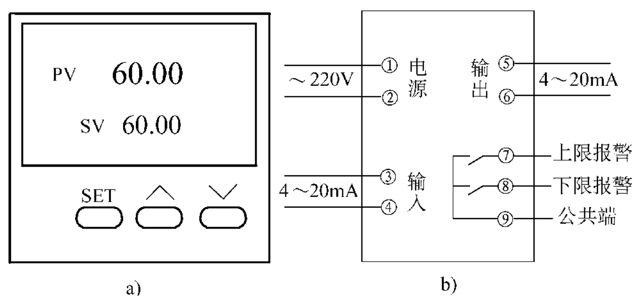


图 6-16　外接 PID 调节器

a）面板　b）接线端子

（3）参数设定　由 SET 键选择预置项目，如目标值、P、I、D 以及上下限值等，然后由∧键和∨键来修改数据，修改后须由 SET 键确认。

问题 29　变频器中比例增益的含义和 PID 调节器有何区别?

变频器的比例增益，就是放大倍数。如图 6-17a 所示，当 X 变化 ΔX 时，如 K_P 小，则 Y 的变化量 ΔY 也小，如图中之曲线①所示；反之，如 K_P 大，则 Y 的变化量 ΔY 也大，如图中之曲线②所示。由图知，K_P 大者，曲线较陡。

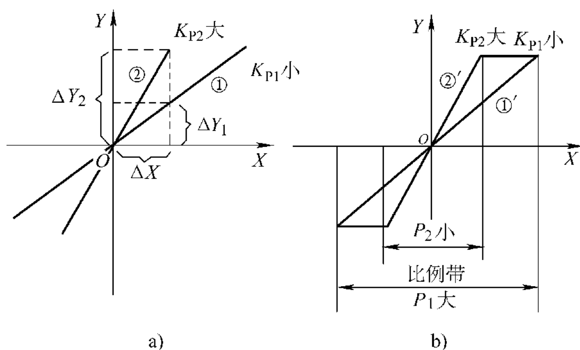


图 6-17　比例增益与比例带

a）比例增益　b）比例带

其他 PID 调节器（如温度控制器等）中的“*P*”，常常是比例带。比例带就是按比例放大的区域。在上、下限都相等的情况下，*P* 越小，则曲线越陡，相当于比例增益越大，如图 6-17b 所示。

所以，比例带和比例增益是互为倒数的关系：

$$P = \frac{1}{K_P} \tag{6-3}$$

问题 30　外接 PID 控制器与变频器如何配合使用？

当采用外接 PID 调节器时，PID 调节器的输出信号将作为变频器的频率给定信号，接至给定信号输入端，如图 6-18 所示。

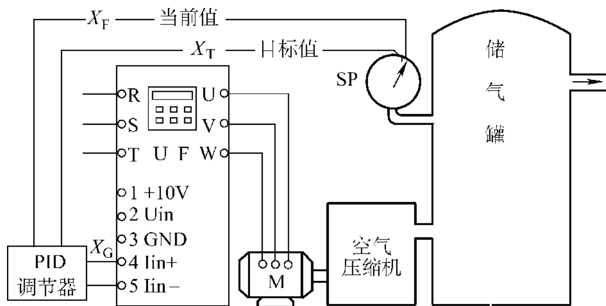


图 6-18　采用外接 PID 调节器

由于变频器的 PID 功能处于无效状态，因此，变频器的加速时间、减速时间等功能全部有效。

在这种情况下，外接 PID 控制器的积分时间和变频器的加速和减速时间对电动机升、降速的快慢都起作用，两者有着叠加的关系，这是必须特别注意的。

对于某些对动态性能要求较高的机械来说，加速时间和减速时间将影响拖动系统的响应能力。而如果加速时间和减速时间太短，起动时又容易因过电流而跳闸。针对这种情况，可以预置两挡加、减速时间：起动过程由时间较长的第一加、减速时间控制；运行过程中则采用时间很短的第二加、减速时间，事实上，加、减速过程将取决于积分时间。

问题31　有一台用于恒温控制的鼓风机，使用变频器的PID功能时，起动时常因过电流而跳闸，怎么办？

由于所选变频器是康沃CVF—P2系列变频器，无PID的切换功能。故建议采用外部PID控制器，如图6-19所示。

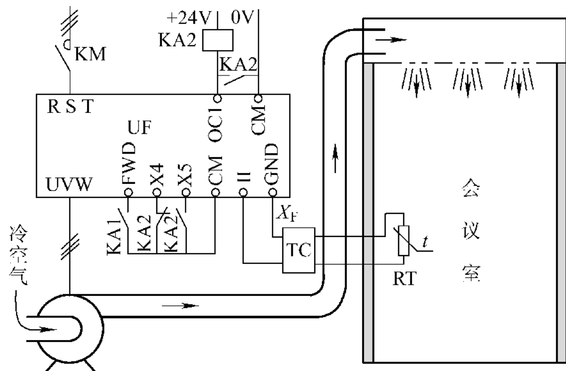


图6-19　采用外部PID控制器的恒温控制

图中，TC是具有PID调节功能的温度控制器，其输出信号作为变频器的频率给定信号，接至变频器的II端（电流信号输入端）。通过将功能码L—66预置为“9”，则输入端子X4为第一加、减速时间选择端；功能码L—67预置为“10”，则输入端子X5为第二加、减速时间选择端。又将功能码b—7（加速时间1）和b—8（减速时间1）预置为40s；功能码H—42（加速时间2）和H—43（减速时间2）预置为2.0s。

继电器KA1用于控制电动机的起动与停机。起动时，继电器KA2未动作，其常闭触点使输入端子X4得到信号，使电动机在起动时按加速时间40s起动。待起动到一定频率（如50Hz）时，输出端OC1导通，继电器KA2得电并动作，其常闭触点断开，常开触点闭合，变频器的输入端子X4失去信号，而X5得到信号，变频器的加、减速时间转为2.0s（考虑到室内温度的变化比较缓慢，故第二加、减速时间不宜过短）。继电器KA2动作后，其常开触点将自锁，继续保持通电状态。

问题32　某车间供水系统，希望通过恒压供水来节能，须注意哪些问题？

车间恒压供水的基本构成和主要控制电路（采用康沃 CVF—P2 变频器）如图6-20所示。

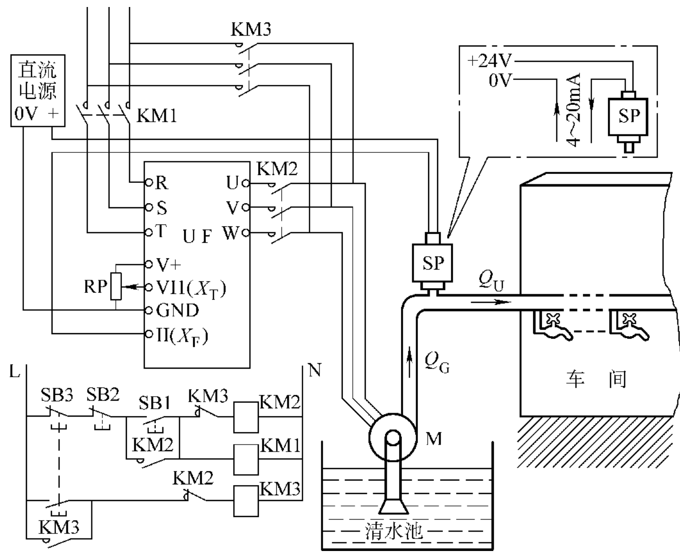


图6-20　车间恒压供水电路

1. 目标信号　由电位器RP给定，从VI1端子输入。
2. 反馈信号　由压力变送器SP取出，从II端子输入。
3. 主要功能预置

H—48（内置PID控制）预置为“2”，变频器处于“恒压供水PID”状态；

H—49（PID设定通道选择）预置为“2”，则目标信号从外部电压信号1（端子VI1）输入；

H—50（PID反馈通道选择）预置为“1”，则反馈信号从电流输入端（端子II）输入；

H—51（反馈信号特性）预置为“0”，则反馈逻辑为“正逻辑”（负反馈）；

H—54（PID控制器结构选择）预置为“2”，则控制器为“PI控

制”。

其余功能，如比例增益 P 和积分时间 I 等在调试过程中酌情调整。

4. 主电路的控制要点　须注意消防用水的控制环节。在左下方的控制电路中：

按钮 SB1 和 SB2 用于控制电动机和变频器之间的连接以及变频器与电源之间的连接；

SB3 是消防按钮，当发生火警时，按下 SB3，则电动机将脱离变频器，而直接接至工频电源，以保证足够的水压。

问题 33　多台变频器同时控制时，为什么以采用外接 PID 控制器为宜？

以两台水泵的 PID 控制为例，如果各台变频器分别用各自的 PID 调节系统进行控制的话，则由于两台变频器的步调不可能完全一致，很容易造成两台变频器的输出频率不断地交替变化的振荡现象。

为了使两台变频器的步调一致，可以采用外接 PID 控制器，如图 6-21 所示。图中，压力传感器的信号接至 PID 调节器，PID 调节器的输出信号接至两台变频器的频率给定端。因为是电流信号，所以，两台变频器的给定电路是互相串联的。

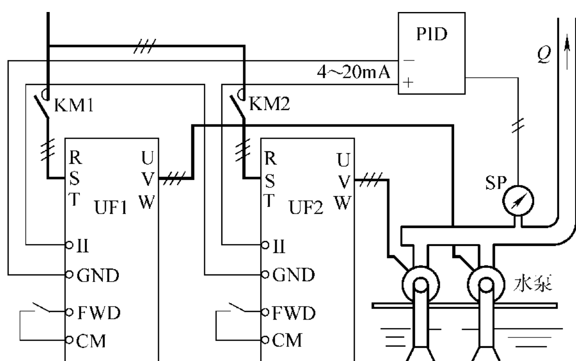


图 6-21　两台变频器的 PID 调节

这样，两台变频器将根据 PID 调节器的输出信号同时加速或减速，不会形成“此起彼伏”的振荡。

问题 34　怎样熟悉和调试变频调速的闭环系统?

1. 手动模拟调试　要熟悉变频器的 PID 功能，可以在系统运行之前，先用手动模拟的方法进行初步的调试。方法如下：

首先，将目标值预置到实际需要的数值（可以通过图 6-22 中的 RP1 调节）;

将一个手控的电压或电流信号(图 6-22 中是从 RP2 上取出的电压信号）接至变频器的反馈信号输入端（图 6-22 中的 VPF 端)。

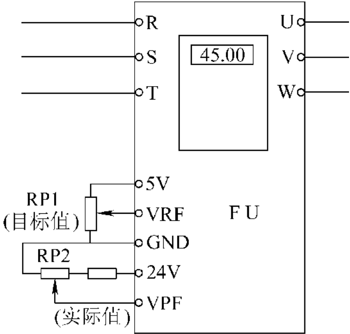


图 6-22　PID 功能的手动模拟调试

缓慢地调节反馈信号，正常的情况是：

当反馈信号低于目标信号时，变频器的输出频率将不断地上升，直至最高频率；反之，当反馈信号高于目标信号时，变频器的输出频率将不断地下降，直至频率为 0Hz。上升或下降的快慢，反映了积分环节的大小。

2. 系统调试　由于 P、I、D 的取值与系统的惯性大小有很大的关系，因此，很难一次调定。这里，根据笔者的经验，介绍一个大致的调试过程。

首先将微分功能 D 调为 0。在许多要求不高的控制系统中，微分功能 D 可以不用。

保持变频器的出厂设定值不变，使系统运行起来，观察其工作情况：

如果在压力下降或上升后难以恢复，说明反应太慢，则应加大比例增益 K_P，直至比较满意为止；在增大 K_P 后，虽然反应快了，但却容易在目标值附近波动，说明系统有振荡，应加大积分时间，直至基本不振荡为止。

总之，在反应太慢时，应调大 K_P，或减小积分时间；在发生振荡时，应调小 K_P，或加大积分时间。

在某些对反应速度较高的系统中，或考虑增加微分环节 D。

6.8　控制参数的选择

问题 35　中央空调的冷却水循环系统的控制参数有几种?

中央空调的冷却水是用来冷却冷冻主机的。将冷却塔中的冷却水流经冷冻主机后，由冷却水泵压回冷却塔，如此循环不已。从冷却塔进入冷冻主机的冷却水称为进水，从冷冻主机流出的水称为回水，如图 6-23 所示。

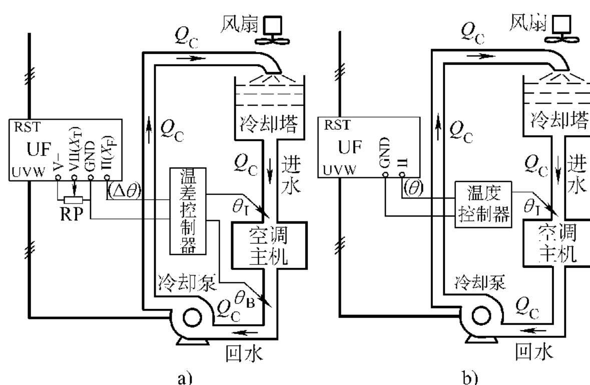


图 6-23　冷却水系统的控制方式
a）恒温差控制　b）进水温度控制

对于冷却水循环系统的控制方式，意见不尽相同，大致有两种：

1. 以进水和回水温度之差作为控制依据　即通过 PID 调节功能实现恒温差控制，如图 a 所示。由于进水温度和回水温度之差反映了空调主机的发热程度。温差大，说明空调主机发热严重，应增大变频器的输出频率，加快冷却水的循环速度，以保证空调主机的冷却效果；反之，温差小，说明空调主机发热不多，可减小变频器的输出频率，减慢冷却水的循环速度，以增大水泵运行的节能效果。

在功能预置方面，除 H—51（反馈信号特性）应预置为“1”，使反馈逻辑为“负逻辑”（正反馈）外，其余都和恒压供水的预置方法相同。

2. 以进水温度作为控制依据　由于进水温度与环境温度有关，

不可能实现恒值控制，所以，不需要预置 PID 功能。而是直接把进水温度的信号作为频率给定信号，如图 b 所示。

在进行功能预置时，须注意以下两点：

（1）必须预置下限频率　就是说，即使水温再低，也必须保证冷却水有一定的流速。

（2）注意调整频率给定线　使频率的变化尽量平缓些。

问题 36　中央空调的冷冻水系统的控制参数有几种？

冷冻水是用来调节房间的室内温度的。从冷冻主机出来的冷冻水，由冷冻泵压入各楼层房间的盘管，然后又回到冷冻主机，如此循环不息。从冷冻主机流出的冷冻水称为出水，回到冷冻主机的水称为回水，如图 6-24 所示。

图 6-24　冷冻水的控制

对于冷冻水循环系统的控制方式，也有多种意见，主要有以下几种：

1. 恒温差控制　就是以回水温度和出水温度之差作为控制依据，进行 PID 控制。这是因为：温差大，说明房间的温度高，应增大变频器的输出频率，加大冷冻水的流速；反之，温差小，说明房间的室温较低，应减小冷冻水的流速。

这种控制方式在冬天还可以用来控制热泵。

变频器的功能预置情况和冷却水相同。

2. 恒温度控制　在我国南方，冬天不需要控制热泵。如果冷冻主机的出水温度比较稳定的话，则只需根据回水温度进行控制就可以达到和恒温差控制相同的效果。

3. 恒压差控制　即根据冷冻水泵的出水压力和进水压力之差来进行控制。尤其是高层宾馆，当某一楼层或若干楼层没有住人时，常常把无人居住楼层的冷冻水支路关闭掉。这时，由于所需流量减小，冷冻水的流速可以适当慢一些。而关闭楼层支路的结果是压差 Δp 增大，就是说，当压差 Δp 增大时，要求变频器的输出频率下降些，属于负反馈。

问题 37　水源水位变化的控制参数有几种？

当取水泵站从大江或大河取水时，水源水位处于不断改变的状态中。对于水源水位变化时变频调速的控制方式，也有两种方法，如图 6-25 所示。分述如下：

1. 恒流量取水　以流量为控制参数，实行恒流量取水，如图所示。

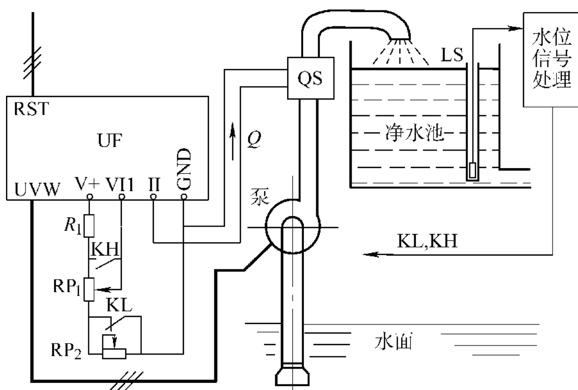


图 6-25　水源水位变化时的变频调速

图中，QS 是流量变送器。因此，反馈信号是与流量成正比的电流信号。

需要清楚的是，取水泵站取出的水通常是并不直接供给用户的，而是将水先泵入净水池，经过处理后再供水给用户的。而净水池流出的流量是取决于用户的用水情况的。所以，当流量恒定时，净水池的

水位有过高或过低的可能。简单处理的方法如图所示：

LS 是水位传感器。正常情况下，目标信号由 R_1 和 RP_1 决定；

当净水池的水位低于下限水位时，继电器 KL 得电，其动断触点断开，RP_2 接入电路，目标信号增大，取水流量也随之增加；

当净水池的水位高于上限水位时，继电器 KH 得电，其动合触点闭合，R_1 被短路，目标信号减小，取水流量也随之减小。

2. 恒压取水　由于流量计价格较昂贵，故有的用户采用恒压控制，实践证明，效果也很好。

问题 38　卷绕机械的恒张力控制的控制参数有几种？

1. 恒张力运行　根据被卷绕物的不同，张力传感器的种类也很不一致。现以纸张卷绕为例，如图 6-26 所示。

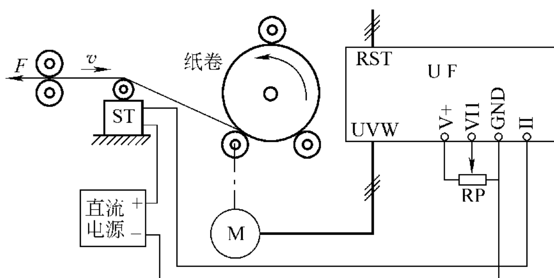


图 6-26　恒张力控制

图中，ST 为张力传感器。

当张力太大时，变频器应减小其输出频率，使卷绕电动机减速。所以，其反馈逻辑是正逻辑（负反馈）。其余功能预置与恒压控制相同。

2. 恒线速度运行　以线速度传感器的输出信号作为反馈信号。当线速度太大时，应使卷绕电动机减速。所以，其反馈逻辑也是正逻辑（负反馈）。

6.9　关于转速闭环控制

问题 39　转速闭环控制和过程闭环控制有什么区别？

1. 过程闭环控制　在生产机械在运行过程中，为了使某一个参

数保持稳定而进行的闭环控制，称为过程闭环控制。例如空气压缩机的恒压控制、中央空调的恒温控制、卷绕机械的恒张力控制等。由于在大多数机械中，需要控制的参数是根据生产工艺的要求决定的，所以，也叫工艺闭环控制。

2. 转速闭环控制　广义地说，凡要求生产机械某部位的转速保持稳定的闭环控制都是转速闭环控制。对于这种转速闭环控制的处理方法，和一般的过程闭环控制并无区别。

在变频器中，如果是 V/F 控制模式下的 PID 控制，事实上是归到过程闭环控制中的。但在“有反馈矢量控制”的控制模式中，“转速闭环控制”是矢量控制过程中的专用功能。

问题 40　转速闭环控制的作用是什么?

转速闭环控制的目的，是提高机械特性的“硬度”。就是说，在给定频率不变，而负载转矩变动的情况下，用于保持电动机的转速基本恒定。

具体地说，当负载转矩突然增大时，电动机的转速必有所下降，通过 PID 调节的作用，使电动机迅速恢复到原来的转速。

如图 6-27 所示，拖动系统正以某一转速 n_{MX}运行。在 t_1 瞬间，当负载转矩从 T_{L1} 突然增加为 T_{L2} 时，电动机的转速将下降 Δn。或者说，与给定转速之间产生了 Δn 的偏差。转速 PID 的作用，就是使电动机的转速迅速地恢复为 n_{MX}。

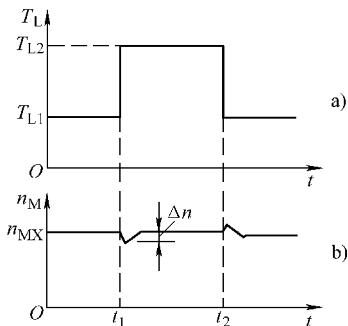


图 6-27　转速 PID 的作用
a）负载转矩　b）电动机转速

反之，在 t_2 瞬间，当负载转矩从 T_{L2}突然减小为 T_{L1}时，电动机的转速与给定转速之间产生负偏差 Δn。转速 PID 功能将使电动机的转速迅速地恢复为 n_{MX}。

问题 41　转速闭环控制中的 P、I、D 和过程闭环控制有无区别?

就 P、I、D 的含义而言，是完全相同的。但具体数据则差别较大，大致如下：

1. 比例增益 P　由于异步电动机的机械特性本来就比较硬，当负载转矩增大或减小时，转速偏差 Δn 不会很大，所以，比例增益不必很大。

2. 积分时间 I　由于拖动系统要求电动机的转速能够在极短的时间内迅速恢复，所以，积分时间不允许很长。

3. 微分时间 D　有的变频器在转速闭环控制中不设微分环节。

现列出几种变频器的参数见表 6-5。

表 6-5　几种变频器的转速 PID 数据与过程 PID 数据的对照

变频器型号	参数名称	转速闭环控制		过程闭环控制	
		功能码	数据码范围	功能码	数据码范围
艾默生 TD3000	比例增益 P	F3.00	0.000～6.000	F7.05	0.0～999.9
	积分时间 I	F3.01	0，0.032～32.00s	F7.06	0，0.01～99.99s
	微分时间 D	—		F7.07	0，0.01～99.99s
安川 CIMR—G7A	比例增益 P	C5-01	1.00～3.00	b5-02	0.00～25.00
	积分时间 I	C5-02	0.000～10.000s	b5-03	0.0～360.0s
	微分时间 D	—		b5-05	0.0～10.0s
丹佛士 VLT5000	比例增益 P	417	0.000～0.150	440	0.00～10.00
	积分时间 I	418	2.00～999.99ms	441	0.01～9999.99s
	微分时间 D	419	0.00～200.00ms	442	0.00～10.00s

第 7 章　变频调速的应用基础

7.1　电力拖动系统中的传动机构

问题 1　常见的传动机构有哪些？传动比怎样定义？

传动机构的种类很多，这里只介绍几种常见的传动机构，如图 7-1 所示。

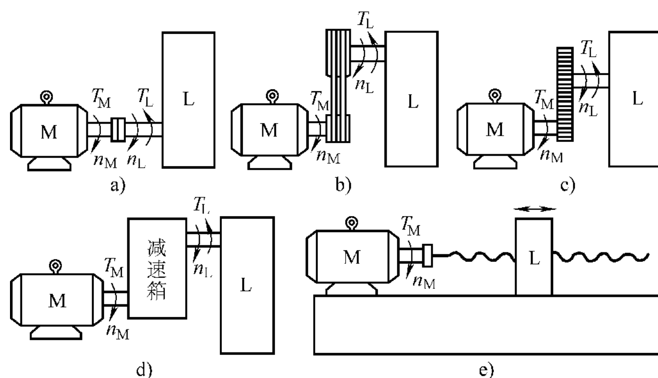


图 7-1　常见的传动机构

a）联轴器　b）皮带　c）齿轮　d）减速器　e）螺杆

1. 常见的传动机构

（1）联轴器　是一种把电动机的输出轴和负载的输入轴直接联接的装置，传动比等于 1，如图 a 所示。常见于水泵和鼓风机中。

（2）皮带　电动机的输出轴和负载的输入轴之间是通过皮带和皮带盘相连接的，在各类机器上用得较多，传动比较小，如图 b 所示。

（3）齿轮　电动机的输出轴和负载的输入轴之间是通过齿轮相连接的，常做成齿轮箱，可通过改变齿轮间的组合来进行有级调速，在各类机床上用得较多，传动比较大，如图 c 所示。

（4）减速箱　是一种由齿轮或蜗轮蜗杆组成的传动比较大的减

速装置，如图 d 所示。

（5）螺杆　是一种把电动机的旋转运动转变成直线运动的装置，如图 e 所示。

2. 传动比　通常，把电动机输出轴的转速与负载输入轴的转速之比称为传动比：

$$\lambda = \frac{n_M}{n_L} \tag{7-1}$$

式中　λ——传动比；

n_M——电动机的转速（r/min）；

n_L——负载的转速（r/min）。

问题 2　经传动机构减速后，转矩为什么会增大？

传动机构在传递能量的过程中，虽然有能量损失，但所占比例很小，粗略计算时，可以忽略不计：

$$\Delta P \approx 0$$

因此，可以认为，负载轴上得到的功率与电动机轴上的功率是相等的，如图 7-2 所示

$$P_L = P_M$$

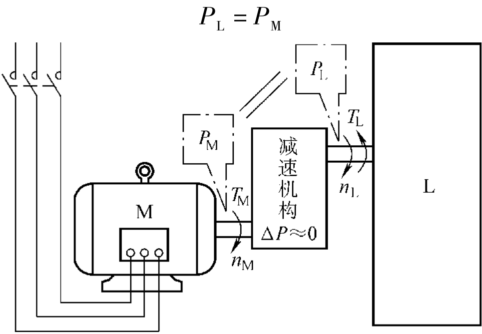


图 7-2　减速机构前后的功率

由机械功率的公式，得

$$\frac{T_L n_L}{9550} = \frac{T_M n_M}{9550}$$

可见，在功率一定的前提下，转矩与转速成反比：

$$\frac{T_L}{T_M}=\frac{n_M}{n_L}=\lambda$$

从而

$$T_L=\lambda T_M \tag{7-2}$$

所以，经过减速机构减速以后，负载轴上得到的转矩是电动机轴上电磁转矩的 λ 倍。

问题 3　采用了传动机构后，转矩、转速为什么要折算？

对于一个拖动系统，经常考虑的问题之一是电动机能否带得动负载？为此，必须在电动机的电磁转矩和负载的阻转矩之间进行比较。但由于电动机轴上的数据和负载轴上的不一样，难以在同一个坐标系里进行比较。

以某 7.5kW、1440r/min 的电动机为例，假设传动比 $\lambda=4$。则

当 $n_M=1440\text{r/min}$ 时，有

$$T_M=\frac{9550P_M}{n_M}=\frac{9550\times7.5}{1440}\approx50\ \text{N}\cdot\text{m}$$

在坐标系里的坐标是（50，1440），如图 7-3 中之 Q_M 点；

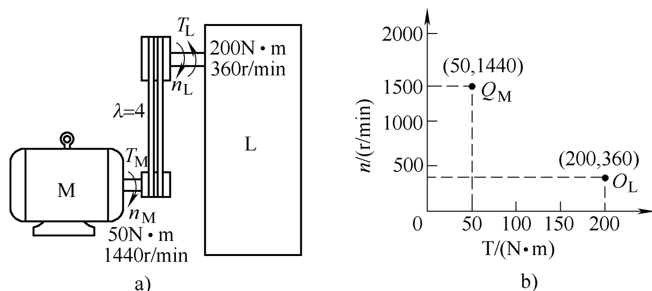


图 7-3　传动机构前后的工作点

a）拖动系统　b）工作点

这时，在负载轴上的转速

$$n_L=\frac{n_M}{\lambda}=\frac{1440}{4}=360\text{r/min}$$

负载轴上的转矩

$$T_L=\lambda T_M=4\times50=200\text{N}\cdot\text{m}$$

在坐标系里的坐标是（200，360），如图 7-3 中之 Q_L 点。

假设，这时的拖动系统正以等速运行，而在同一个坐标系里，电动机和负载的工作点却相差甚远，两者之间无法进行比较。

解决这个问题的方法是：把不同轴上的转矩和转速都换算到同一个轴上。在大多数情况下，都换算到电动机轴上。这样的换算，称为折算。

问题 4　怎样进行转矩、转速的折算?

凡折算后的物理量，后面都缀以“′”。各主要物理量的折算公式如下：

1. 转速的折算

$$n_L' = n_L\lambda \tag{7-3}$$

式中　n_L'——折算到电动机轴上的负载转速（r/min）。

实际上，n_L'就是电动机的转速

2. 转矩的折算

$$T_L' = \frac{T_L}{\lambda} \tag{7-4}$$

式中　T_L'——折算到电动机轴上的负载转矩（N · m）。

式（7-4）表明，采用了减速机构以后，相当于把电动机轴上的负载减轻了 λ 倍。

3. 飞轮力矩的折算

$$GD_{L'}^2 = \frac{GD_L^2}{\lambda^2} \tag{7-5}$$

式中　$GD_L{}^2$——负载的飞轮力矩（N · m^2）；

$GD_{L'}^2$——折算到电动机轴上的飞轮力矩（N · m^2）。

式（7-5）说明，采用了减速机构以后，相当于把电动机轴上的飞轮力矩减小了 λ^2 倍，这对于电动机的加速和减速过程来说，是十分有利的。

问题 5　某传输机采用变频调速时把传动比减小了一些，结果满载时电动机电流超过了额定值，发热严重，问题出在哪里?（实际最高工作频率为 40Hz）

采用变频调速时减小传动比是不对的，说明如下：

假设负载转矩为 T_L,原来的传动比是 λ,改变后的传动比是 λ',则

在原传动比的情况下，负载转矩的折算值

$$T'_{L1}=\frac{T_L}{\lambda}$$

传动比改变后，负载转矩的折算值

$$T'_{L2}=\frac{T_L}{\lambda'}$$

当 $\lambda'<\lambda$ 时，$T'_{L2}>T'_{L1}$。所以，传动比减小后，电动机轴上的负载增大了。

问题 6　某电动机带重物作圆周运动，如图 7-4 所示。运行到达 A 点后电动机开始过载，到达 B 点时容易堵转，怎样解决？（上限频率为 45Hz）

可以通过加大传动比来解决。

如将传动比加大 10%，则在电动机转矩相同的情况下，带负载能力也加大 10%。但这时的上限频率也应加大为 10%：

$$\begin{aligned}f'_H&=f_H\ (1+10\%)\\&=45\ (1+10\%)\\&=49.5\text{Hz}\end{aligned}$$

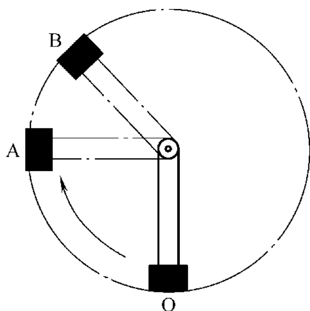


图 7-4　带重物作圆周运动

如将传动比加大 15%，则在电动机转矩相同的情况下，带负载能力也加大 15%。但这时的上限频率应加大为 52Hz。

问题 7　某恒转矩负载，电动机功率为 22kW，额定转速为 1470r/min，传动比 λ=4，采用无反馈矢量控制变频调速，在最低工作频率（4Hz）**时运行不稳定，怎样解决？**（满载运行频率范围为 4～40Hz）

部分变频器在无反馈矢量控制方式下运行时，工作频率在 6Hz 以下时，运行不够稳定。可以通过加大传动比，使最低工作频率超过 6Hz（最好在 10Hz 以上）就可以了。

结合本例，具体计算如下：

1. 基本数据

（1）电动机的额定转矩　因为 $P_{MN}=22kW$，$n_{MN}=1470r/min$

$$\therefore \qquad T_{MN}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times22}{1470}=143N\cdot m$$

在无强制通风的条件下，运行频率为4Hz时，允许的负载率通常不到80%。

（2）负载转矩　电动机的负载率约为80%（$\sigma=0.8$），则由式（7-3）：

$$T_L=T_{MN}\lambda\sigma=143\times4\times0.8=457.6\ N\cdot m$$

2. 改进方法及计算

（1）基本考虑　将传动比加大为 $\lambda'=8$，使最低工作频率增大为8Hz

（2）核算　因为最高工作频率将上升为80Hz，因此，必须核算在80Hz下运行时，电动机能否长时间运行。

当运行频率为80Hz时，电动机允许的负载率与转速成反比：

$$\sigma'=\frac{f_N}{f_X}\times100\%=\frac{50}{80}\times100\%=62.5\%$$

电动机的有效转矩

$$T_{MEX}=T'_{MN}\sigma=143\times62.5\%=89.4\ N\cdot m$$

由式（7-4），负载转矩的折算值

$$T'_L=\frac{T_L}{\lambda'}=\frac{457.6}{8}=57.2\ N\cdot m<T_{MEX}$$

所以，此法可用。

问题8　某带式输送机，原用三相换向器电动机，功率为7kW，实测最大电流为12A，最高运行转速为1200r/min，调速范围 $\alpha_n=2$；传动机构的齿轮箱传动比 $\lambda=5$。改用变频调速时，选用4极、5.5kW异步电动机，额定电流为11.6A，工作频率范围是21～42Hz。满载时实测电流为11.5A，但电动机温度偏高，如何改进？

1. 基本分析　因为电动机的最高工作频率是42Hz，这时电动机的实际容量

$$P_{MX}=P_{MN}\frac{f_X}{f_N}=5.5\times\frac{42}{50}=4.6kW$$

因为实测电流与额定电流十分接近，故可以认为，这基本上等于负载功率。

如果适当加大传动比，使电动机的工作频率上升至 50Hz 左右，则：

从容量上看，电动机的实际容量等于额定容量，大于负载功率，具有了一定的裕量。

从转矩上看，加大了传动比后，可以减轻电动机轴上的负载率，减小电动机的运行电流。

2. 具体计算　由电动机的额定数据：$P_{MN}=5.5\text{kW}$，$n_{MN}=1440\text{r/min}$，算出电动机的额定转矩如下：

$$T_{MN}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times5.5}{1440}=36.5\text{N}\cdot\text{m}$$

因为 $\lambda=5$，故由式（7-3），求出负载侧转矩为：

$$T_L=T_{MN}\lambda=36.5\times5=182.5\text{N}\cdot\text{m}$$

根据运行情况，满载时电动机的负载率为 $\sigma_A=100\%$。

如将传动比增大为 $\lambda'=6$，则由式（7-4），负载转矩的折算值为

$$T_L'=\frac{T_L}{\lambda'}=\frac{182.5}{6}=30.4\text{N}\cdot\text{m}$$

电动机轴上的负载率为

$$\sigma_A=\frac{T_L'}{T_{MN}}=\frac{30.4}{36.5}=83.3\%$$

显然，可以减轻电动机的负载。但在这时，上限工作频率应调整为

$$f_H'=f_H\frac{\lambda'}{\lambda}=42\times\frac{6}{5}=50.4\text{Hz}$$

即工作频率的范围是：25.2～50.4Hz。

问题 9　某大惯性负载采用变频调速后，加速时间需预置到 10s 以上，起动时才不跳闸，希望能把起动过程缩短到 6s 以内，怎么解决？

如能加大传动比，则可通过适当加大传动比来解决。具体计算如

下：

电动机起动时间的计算公式：

$$t_S = \frac{GD^2 n_M}{375 T_{SA}} \tag{7-6}$$

式中　t_S——起动所需时间（s）；

T_{SA}——起动过程中的平均转矩（N·m）。

原来的起动时间为 $t_{S1} = 10s$，希望调整后的起动时间为 $t_{S2} = 6s = 0.6\ t_{S1}$。

由式（7-5）知，唯一的途径是把电动机轴上的飞轮力矩调整为

$$(GD^2)_2 = 0.6(GD^2)_1$$

要调整电动机轴上的飞轮力矩，只有调整传动比。

假设原来的传动比是 λ_1，调整后的传动比是 λ_2。

代入式（7-5），使

$$\frac{GD_L^2}{\lambda_2^2} = 0.6\frac{GD_L^2}{\lambda_1^2}$$

得

$$\lambda_2 = \sqrt{\frac{1}{0.6}}\lambda_1 = 1.3\lambda_1$$

就是说，把传动比增大为原来的 1.3 倍就可以了。但必须注意校核在传动比增大后的最高工作频率和对应的有效转矩是否满足要求。

如果不能增大传动比，则只有加大变频器的容量了。

7.2　变频调速系统必须满足的条件

问题 10　变频调速拖动系统必须满足哪些条件？

变频调速拖动系统要能够正常工作，必须满足的基本条件如图 7-5 所示，有以下两个：

1. 要容得下　根据能量守恒的原理，电动机轴上的输出功率必须不小于负载所需要的功率：

$$P_{MX}=\frac{T_{MN}n_{MX}}{9550}\geqslant\frac{T_{L}n_{LX}}{9550}=P_{LX} \tag{7-7}$$

式中　P_{MX}——电动机在转速为 n_{MX}时的有效功率（kW）；

n_{MX}——电动机经调节后的转速（r/min）；

n_{LX}——当电动机转速为 n_{MX}时的负载转速（r/min）；

P_{LX}——负载在转速为 n_{LX}时的功率（kW）。

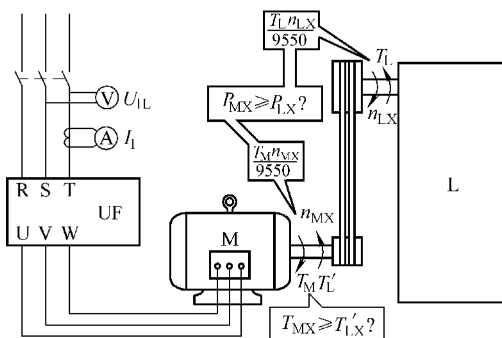


图 7-5　变频调速拖动系统必须满足的条件

2. 要带得动　电动机能否带动负载运行，归根到底，要看在整个调速范围内，电动机所产生的电磁转矩能不能克服负载的阻转矩，即，是否满足：

$$T_{MX}\geqslant T_{LX} \tag{7-8}$$

式中　T_{MX}——电动机在某一转速下的有效转矩（N · m）；

T_{LX}——负载在该转速下的阻转矩（N · m）。

这里涉及到两个方面的问题：

（1）电动机在调频率过程中的有效转矩与负载机械特性之间的比较，即电动机能否在调速范围内都满足式（7-8）的要求。

（2）必须注意容量相同但磁极对数不同的电动机，额定转矩是不一样的，其带负载能力也是不一样的。例如，同样是 75kW 的电动机，不同磁极对数的额定转矩如下：

$2p=2$：$n_{MN}=2970$r/min，$T_{MN}=241$N · m；

$2p=4$：$n_{MN}=1480$r/min，$T_{MN}=484$N · m；

$2p=6$：$n_{MN}=980$r/min，$T_{MN}=731$N · m。

问题 11　某恒转矩负载，电动机数据是：75kW，139.7A，1480 r/min，实际运行电流是 133A，减速箱的传动比 $\lambda=5$，使用变频调速后，减速箱能否省去？

简单地把减速箱省去是不对的，说明如下：

1. 基本计算数据

（1）电动机的额定转矩

$$T_{\mathrm{MN}}=\frac{9550P_{\mathrm{MN}}}{n_{\mathrm{MN}}}=\frac{9550\times75}{1480}=484\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

（2）电动机的负载率

$$\sigma_{\mathrm{A}}\approx\frac{I_{\mathrm{MX}}}{I_{\mathrm{MN}}}=\frac{133}{139.7}=0.95$$

（3）在额定情况下减速箱输出轴上的转矩

$$T'_{\mathrm{MN}}=T_{\mathrm{MN}}\lambda=484\times5=2420\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

（4）负载的实际阻转矩

$$T_{\mathrm{L}}=T'_{\mathrm{MN}}\sigma_{\mathrm{A}}=2420\times0.95=2299\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

（5）负载的转速

$$n_{\mathrm{L}}=\frac{n_{\mathrm{MN}}}{\lambda}=\frac{1480}{5}=296\mathrm{r/min}$$

（6）负载的实际功率

$$P_{\mathrm{L}}=\frac{T_{\mathrm{L}}n_{\mathrm{L}}}{9550}=\frac{2300\times296}{9550}=71.3\mathrm{kW}$$

2. 减速箱不能省去的分析　可以从两个方面来说明：

（1）从能量的角度看　电动机在 50Hz 时的额定功率是 75kW，在 10Hz 运行时，因为转速下降为额定转速的 20%，其有效功率也下降为额定功率的 20%，只有 15kW 了，如图 7-6b 所示。与负载所需要的 71.3kW 相比，相去甚远。

（2）从转矩的角度看　因为负载的阻转矩是 2300N · m，有减速箱时，减速箱输出轴上的转矩可达：

$$T_{\mathrm{MN}}\lambda=484\times5=2420\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}$$

所以，带动负载是不成问题的。

但如果省去减速箱后，电动机轴上的转矩只有 484N · m，比负

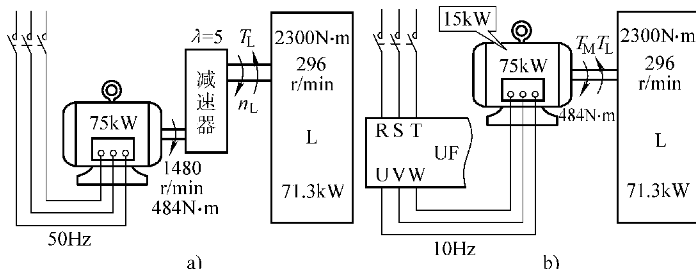


图 7-6　省去减速箱的结果

a）有减速箱的情形　b）省去减速箱的情形

载的阻转矩小得多，是带不动负载的。

问题 12　提升机电动机数据：30kW，56.8A，1470 r/min。最大运行电流约为 50A。现打算把工作频率提高为 60Hz，行不行?

1. 基本计算数据

（1）电动机的额定转矩

$$T_{MN}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times30}{1480}=193.6\text{N}\cdot\text{m}$$

（2）电动机的最大负载率

$$\sigma_A\approx\frac{I_{MX}}{I_{MN}}=\frac{50}{56.8}=0.88$$

2. 分析

（1）允许的负载率　当工作频率为 60Hz 时，允许的负载率为

$$\sigma_A'=100\%\frac{f_N}{f_X}\qquad(f_X>f_N)$$

$$=100\%\times\frac{50}{60}=83\%$$

（2）电动机的过载率

$$\beta=\frac{\sigma_A}{\sigma_A'}=\frac{0.88}{0.83}=1.06$$

3. 结论

（1）过载 6%，并不严重；

（2）提升机属于断续负载，电动机是允许短时间过载的。

所以，上述考虑是可行的，如图 7-7 所示。但在负载较重时，应注意电动机的温升。

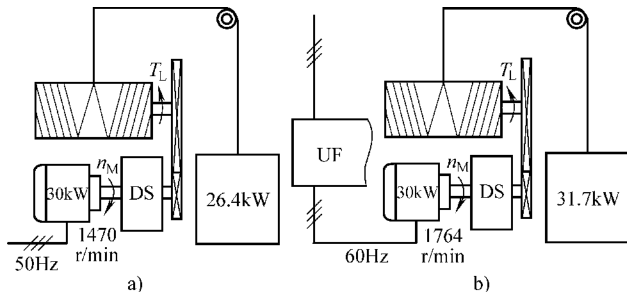


图 7-7　加大频率提高劳动生产率

a）正常运行时　b）频率提高后

问题 13　某带式输送机，电动机数据是：15kW，30.3A，1460 r/min，最大运行电流约为 28A，减速箱的传动比 $\boldsymbol{\lambda}=10$，打算把传动比减小为 $\boldsymbol{\lambda}=8$，以提高生产率行不行？

1. 基本计算数据

（1）电动机的额定转矩

$$T_{MN}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times15}{1460}=98\text{N}\cdot\text{m}$$

（2）电动机的负载率

$$\sigma_A\approx\frac{I_{MX}}{I_{MN}}=\frac{28}{30.3}=0.92$$

（3）负载功率的估算

$$P_{L1}\approx P_{MN}\sigma_A=15\times0.92=13.8\text{kW}$$

（4）负载的转速

$$n_{L1}=\frac{n_{MN}}{\lambda_1}=\frac{1460}{10}=146\text{r/min}$$

2. 分析

（1）传动比减小后的负载转速

$$n_{L2}=\frac{n_{MN}}{\lambda_2}=\frac{1460}{8}=182.5\ \text{r/min}$$

（2）传动比减小后的负载功率　带式输送机是恒转矩负载，其功率与转速成正比，故

$$P_{L2}=P_{L1}\frac{n_{L2}}{n_{L1}}13.8\times\frac{182.5}{146}=17.25\ \text{kW}>P_{MN}=15\ \text{kW}$$

3. 结论　从以上分析可知，传动比减小为 $\lambda=8$ 后，电动机将过载运行。由于带式输送机是连续运行的负载，电动机将长时间过载，是不适宜的，如图 7-8 所示。

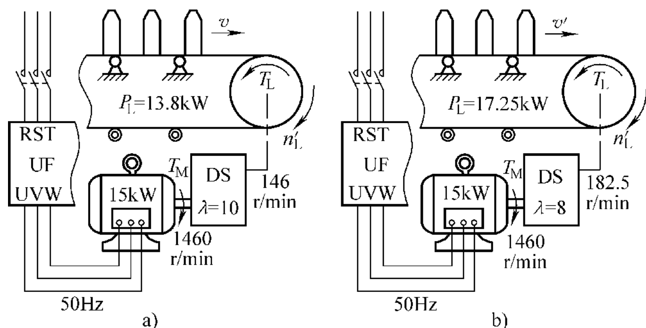


图 7-8　减小传动比提高劳动生产率

a）传动比减小前　b）传动比减小后

问题 14　公司欲对升降机提速，电力拖动系统如图 7-9 所示。电动机参数：1.5kW、3.7A、4 极、1400r/min 传动比：20。变频器配用电动机功率：2.2kW。

升降机概况：轿厢重约 160kg，对重为 100kg。楼面高 4.5m，轿厢往返一次约 10s，工作频率为 52Hz，实测最大电流：3.1A。

要求轿厢往返一次缩短为 8s，如何解决？

1. 基本计算数据

（1）电动机的额定转矩

$$T_{MN}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times1.5}{1400}=10\text{N}\cdot\text{m}$$

（2）电动机的负载率

$$\sigma_{A1} \approx \frac{I_{MX}}{I_{MN}} = \frac{3.1}{3.7} = 0.84$$

（3）负载功率的估算

$$P_{L1} \approx P_{MN} \cdot \sigma_{A1} = 1.5 \times 0.84 = 1.26\text{kW}$$

（4）电动机的实际转速

$$n_{M1} = n_{MN}\frac{f_X}{f_N} = 1400 \times \frac{52}{50} = 1456\text{r/min}$$

（5）负载的转速

$$n_{L1} = \frac{n_{M1}}{\lambda} = \frac{1456}{20} = 72.8\text{r/min}$$

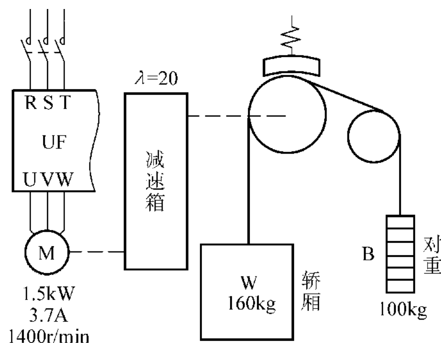


图7-9　升、降机拖动系统

（6）负载的转矩

$$T_L = \frac{9550P_{L1}}{n_{L1}} = \frac{9550 \times 1.26}{72.8} = 165.3\text{N} \cdot \text{m}$$

2. 提速后的计算

（1）负载转速

$$n_{L2} = n_{L1}\frac{t_1}{t_2} = 1456 \times \frac{10}{8} = 1820\text{r/min}$$

式中　t_1——提速前往返一次所需时间（s）；

t_2——提速后往返一次所需时间（s）。

（2）负载功率　升、降机是恒转矩负载，其功率与转速成正比：

$$P_{L2} = P_{L1}\frac{t_1}{t_2} = 1.26 \times \frac{10}{8} = 1.575\text{kW}$$

（3）工作频率

$$f_{X2} = f_X\frac{t_1}{t_2} = 52 \times \frac{10}{8} = 65\text{Hz}$$

（4）电动机的允许负载率　因为在额定频率以上，允许负载率

与频率成反比：

$$\sigma_{A2}=100\%\frac{f_N}{f_{X2}}=100\%\times\frac{50}{65}=77\%$$

（5）电动机允许的输出转矩

$$T_{M2}=T_{MN}\sigma_{A2}=10\times0.77=7.7\text{N}\cdot\text{m}$$

（6）负载转矩的折算值

$$T_L'=\frac{T_L}{\lambda}=\frac{165.3}{20}=8.3\text{N}\cdot\text{m}=1.08T_{M2}$$

3. 分析　从转矩的角度看，电动机过载甚微。由于升、降机属于断续负载，允许短时间过载。因此，针对这种情况，须进行具体分析如下：

（1）如最大负载并不经常出现，则可用；

（2）如经常在最大负载下运行，且起、制动频繁，则电动机最好加大为 2.2kW。

4. 制动电阻的计算　因为已经有对重，故制动电流可按电动机额定电流的 50% 计算：

$$I_B=50\%I_{MN}\approx2\text{A}$$

$$R_B=\frac{U_D}{I_B}\approx\frac{600}{2}=300\Omega$$

$$P_{B0}=\frac{U_D^2}{R_B}\approx\frac{600^2}{300}=1.2\text{kW}$$

可用 3 根 500W 的电炉丝串联，计算如下：

∵　500W 电炉丝的热态电阻

$$R_{B0}=\frac{U^2}{P}=\frac{220^2}{500}=96.8\Omega$$

3 根串联后的总电阻：

$$R_B'=96.8\times3=290\Omega$$

比所要求的略小一点，故制动单元应加大一挡。

问题15　某排粉机原用三相换向器电动机，其数据：160/53.3kW，285/175A，1050/350r/min。改造为普通电动机变频调速，电动机数据：160kW，275A，380V，1480r/min。在转速为1050r/min时，电动机过载，电流达316A，是什么原因？

1. 基本分析

（1）从转矩看　原来电动机的额定转矩

$$T_{MN0}=\frac{9550P_{MN0}}{n_{MN0}}=\frac{9550\times160}{1050}=1455\text{N}\cdot\text{m}$$

改造后电动机的额定转矩

$$T_{MN}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times160}{1480}=1032\text{N}\cdot\text{m}$$

由于改造后所用电动机的额定转速提高了，尽管额定功率和原来一样，但额定转矩却减小了。所以，电动机处于过载状态。

（2）从功率看　160kW、1480r/min的电动机，当转速为1050r/min时，实际的输出功率：

$$P_{MX}=\frac{T_{MN}n_{MX}}{9550}=\frac{1032\times1050}{9550}=113\text{kW}$$

式中　n_{MX}——电动机的工作转速（r/min）；

P_{MX}——电动机在转速为n_{MX}时的输出功率（kW）。

可见，变频调速后，电动机在1050 r/min时的输出功率也是不足的。

2. 解决办法　增大传动比。假设原来的传动比是λ，则增大后的传动比λ'：

$$\lambda'=\frac{n_{MN}}{n_{MN0}}\lambda=\frac{1480}{1050}\cdot\lambda=1.4\lambda$$

这样，电动机的转速将提高到额定转速附近，但负载转速不变。

考虑到传动比不大容易调整到正好合适，根据运行数据来看，电动机是有一定余量的。故选择范围可扩展为

$$\lambda'=(1.25\sim1.5)\lambda$$

7.3　恒转矩负载的变频调速

问题16　什么是恒转矩负载？主要特点是什么？

1. 恒转矩负载的含义　所谓恒转矩负载，是指在调节转速的过程中，负载的阻转矩不变。或者说，负载转矩的大小，仅仅取决于负载的轻重，而和转速大小无关。

其典型代表如带式输送机，其基本结构和工作情况如图7-10a所示。

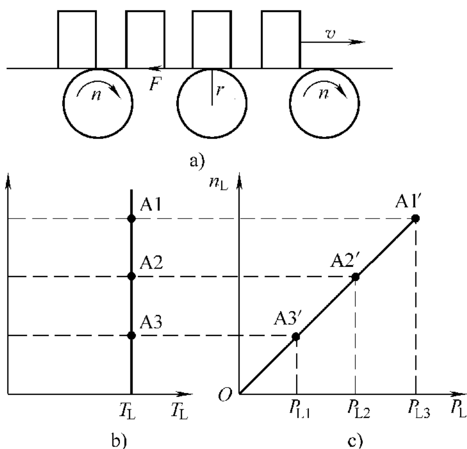


图7-10　恒转矩负载及其特性

a）带式输送机　b）机械特性　c）功率特性

2. 特点分析　要分析负载的运行特点，首先要看它的阻转矩是怎样形成的，然后分析这些构成阻转矩的因素和转速之间是怎样的关系。具体分析如下：

（1）负载阻转矩的构成　如图，带式输送机的阻力主要是皮带与滚轮之间的磨擦力 F，其作用半径是滚轮的半径 r，所以，阻转矩的大小取决于：

$$T_L = Fr \tag{7-9}$$

式中　F——皮带与滚轮间的摩擦力（N）；

r——滚轮的半径（m）。

（2）阻转矩的特点　由于 F 和 r 都和转速的快慢无关，所以在调节转速 n_L 的过程中，负载的阻转矩 T_L 保持不变，即具有恒转矩的特点：

$$T_L = \text{const}$$

其机械特性曲线如图7-10b所示。

（3）功率特点　因为

$$P_L = \frac{T_L n_L}{9550} = k_{P1} n_L \tag{7-10}$$

式中　k_{P1}——比例常数。

可见，负载功率与转速成正比，其有效功率线如图 7-10c 所示。

问题 17　怎样选择恒转矩负载控制方式？

选择控制方式的主要依据如下：

1. 负载对机械特性和动态响应的要求　要求不高者，可选择 V/F 控制方式；对机械特性要求较高者，应选择矢量控制方式；如对动态响应也有较高要求者，更应考虑选择有反馈矢量控制方式。

2. 负载要求的调速范围　调速范围不大者，可选择 V/F 控制方式或无反馈矢量控制方式；如调速范围较大者，最好选择有反馈矢量控制方式，并且要注意电动机的散热问题。

一般说来，许多原来采用电磁调速电动机（滑差电动机）、三相整流子电动机、或其他非直流电动机调速的机械。因为这些调速方法的调速范围都不大，特性也并不理想，所以，在改造为变频调速时，选择 V/F 控制，配合转差补偿的方式都能满足要求。

问题 18　怎样预置恒转矩负载的加、减速时间？

选择加、减速时间的主要依据有：

1. 负载的惯性（GD^2）大小　要准确地测定负载的 GD^2 是比较困难的。实际工作中，可以粗略地进行观察：首先使电动机在带负载的情况下全速运行，然后切断电动机的电源，使之处于自由制动状态，观察其从全速运行到完全停住所需要的时间。则大体可以知道其惯性大小了。加、减速时间可以大致按自由制动时间的（1/3）来以预置，然后再根据具体情况进行调整：如起动过程中，电流偏大，则加、减速时间应适当延长些。

2. 负载对加、减速时间的要求　以传输带为例，有如下情形：

（1）有的传输带一经起动之后，就不再停机。这样的负载，对加、减速时间是没有什么要求的，则加、减速时间应尽量预置得长一些，以避免过电流和过电压的出现。制动时，可不必接入制动电阻和制动单元。

（2）有的传输带是在流水作业中用于转换工位的，其工作特点是起动与制动频繁，而每次的运行时间不长。对于这类负载，如加、

减速时间预置得过长，将影响劳动生产率，故应预置得越短越好。因此，制动电阻和制动单元是必须的。

问题 19　恒转矩负载实现变频调速后，怎样确保其转速的调节范围？

1. 问题的提出　一般情况下，通用电动机在采用变频调速后，其有效转矩线如图 7-11 所示。图中的横坐标是电动机的负载率 β_A：

$$\beta_A = \frac{T_L'}{T_{MN}} \qquad (7\text{-}11)$$

由图可知，在拖动恒转矩负载时，负载率不同，允许长时间运行的最高频率和最低频率是不一样的，因此，调速范围也不同。负载率越大，允许的调速范围越小。

于是，就产生了调速范围是否满足负载要求的问题。

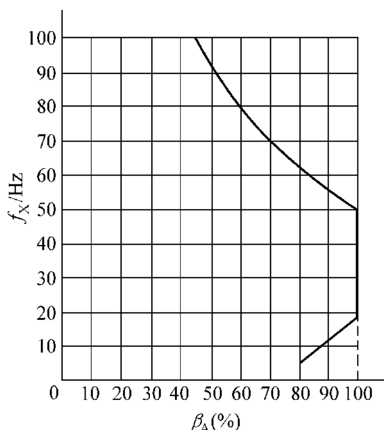


图 7-11　变频调速系统的有效转矩线

2. 调速范围不够时的解决办法　以某负载为例：

$T_L = 140$（N · m），$n_{max} = 720$r/min；$n_{min} = 80$ r/min（$\alpha_n = 9$）

原选电动机的数据：$P_{MN} = 11$kW，$n_{MN} = 1460$ r/min。

变频器说明书中的有效转矩线如图 7-11 所示。

（1）基本数据的计算

1）电动机额定转矩

$$T_{MN} = \frac{9550P_{MN}}{n_{MN}} = \frac{9550 \times 11}{1460} = 72 \text{ N·m}$$

2）负载转矩的折算值

$$T_L' = \frac{T_L}{\lambda} = \frac{140}{2} = 70 \text{ N·m}$$

3）电动机的负载率

$$\beta = \frac{T_L'}{T_{MN}} = \frac{70}{72} = 0.97$$

由图知，最高频率 $f_{max} = 50\text{Hz}$；最低频率 $f_{min} = 20\ \text{Hz}$，允许的频率调节范围：

$$\alpha_f = \frac{f_{max}}{f_{min}} = \frac{50}{20} = 2.5$$

不能满足负载的要求。

（2）满足调速范围的方法　由图知，如果负载率为 70% 的话，则频率调节范围可扩大为 6～70Hz，能够满足负载的要求：

$$\alpha_f = \frac{f_{max}}{f_{min}} = \frac{70}{6} = 11.7 > \alpha_n \quad (=9)$$

要使电动机的负载率减小到 70%，则负载转矩折算到电动机轴上的值应限制在：

$$T_L' \leqslant 72 \times 70\% = 50.4\text{N} \cdot \text{m}$$

由式（7-4），可计算出所需的传动比：

$$\lambda' \geqslant \frac{T_L}{T_L'} = \frac{140}{50.4} = 2.78$$

选　$\lambda' = 2.75$

所以，解决调速范围不够的方法之一，是适当调整传动比，从而调节了电动机轴上的负载率。

问题 20　某重灰炉（用于粉末状物料的干燥）的炉体要求重载起动，曾采用软起动器起动，十分困难，只能减载起动，不符合工艺要求。如采用变频器起动，能否起动起来？如工作频率在 50Hz 左右，是否有节能的可能？

电动机数据：$P_{MN} = 250\text{kW}$；$n_{MN} = 1480\text{r/min}$；$I_{MN} = 461\text{A}$

运行电流 $I_M = 380 \sim 440\text{A}$

负载转速：$n_L = 6\ \text{r/min}$。齿轮箱传动比：$\lambda = 247$

采用变频器后，起动转矩可达电动机额定转矩的 150%～200%，完全可以起动。

关于节能问题，可以从两个方面来考虑。

1. 负载的均衡性　在每旋转一转的过程中，负载电流是否有变化。如果有变化，则即使在 50Hz 下运行，也有节能的可能。具体方法就是采用具有自动节能功能的变频器。

2. 试探是否能在小范围内进行调速　根据经验，有不少负载不进行调速，是因为原来不能调速。实际上，适当调速在提高产品质量方面是有用的。如果能在一定范围内进行调速，则节能是没有问题的。

问题 21　某恒转矩负载的电动机数据：30kW，1470 r/min，56.8A。采用变频调速后，常用频率为 20～30Hz，最高频率为 50Hz。存在问题：（1）起动困难；（2）低频运行过程中有时电流偏大，如何解决？

1. 理想的方法

（1）加大传动比　传动比加大后，负载侧得到的转矩增大，上述问题都可解决。但传动比是否容易改变，是个问题。

（2）采用有反馈矢量控制方式　有反馈矢量控制方式可使起动转矩增加至电动机额定转矩的 180%～200%，低频运行时的带负载能力也较强，上述问题也可较好地解决。但需要增加转速反馈环节，比较费事。

2. 可采取的其他方法

（1）如果原来的 U/f 比（转矩提升）预置得较小的话，可以适当增大 U/f 比。

（2）适当降低基本频率，以加大电动机的工作磁通，但基本频率不宜低于 45Hz。

（3）预置转差补偿功能，以增强电动机的带负载能力；同时，适当设定起动频率，以增加起动时的冲击力。

问题 22　某恒转矩负载采用变频调速后，在运行过程中负载稍有增加就容易堵转，怎么办？

1. 预置转差补偿功能　在 V/F 控制方式下，预置转差补偿功能可以加大电动机的带负载能力。

2. 降低载波频率　原来预置的载波频率为 10kHz，据实测，变频器的输出电压（电动机侧电压）偏低。将载波频率降到 5kHz 以下，

可以适当改善。这是因为：

以运行频率为 50Hz 计，当载波频率为 10kHz 时，为运行频率的 200 倍，就是说，每个周期有 200 个电压脉冲，每个脉冲，逆变桥将交替导通两次，则每个周期逆变桥将交替 400 次。假设每次交替导通时，死区为 5μs，则一个周期中，死区所占的总时间为 800μs。即，在一个周期（20ms）中，有 800μs 的时间是不工作的，占一个周期的 4%。则变频器的输出电压 U'将下降为

$$U' = 380 \times (1 - 0.04) = 364.8\text{V}$$

如把载波频率降为 5kHz，则死区总时间只占一个周期的 2%，变频器的输出电压可上升为

$$U'' = 380 \times (1 - 0.02) = 372.4\text{V}$$

所以，如果电动机的电磁噪声并不严重的话，载波频率不必预置得太高。

3. 采用矢量控制方式　如果电动机具有矢量控制功能的话，则在矢量控制方式下，电动机的带负载能力将有所增加。

4. 加大传动比　根据所介绍情况，传动比只要稍微加大一点就可以了。

问题 23　透平压缩机的盘车电机，因负荷很大，难以起动。电机参数如下：37kW、70A、1470r/min，如何解决？

在变频调速的情况下，首先可以试探的方法有：

（1）增加转矩提升量，或采用自动转矩提升功能；

（2）采用矢量控制方式；

（3）预置起动频率（6～10）Hz。

如果还是难以起动，则可采取的方法有：

（1）加大传动比，以减轻电动机轴上的折算转矩；

（2）改选 6 极电动机。

问题 24　440V、60Hz 的电动机，配用 380V 的变频器，可以吗？

可以的，首先作出 440V、60Hz 电动机的基本 U/f 线，如图 7-12 中之 OA 线。今电源电压为 380V，基本 U/f 线如图中之 OB 所示。按比例算出与 380V 对应的频率是 52Hz。因此，如把基本频率预置为 52Hz，就可以得到和原设计相同的额定转矩。事实上，把基本频率预

置为 50Hz，也是可以的。并且，其有效转矩还可以比原设计的额定转矩略大一点。

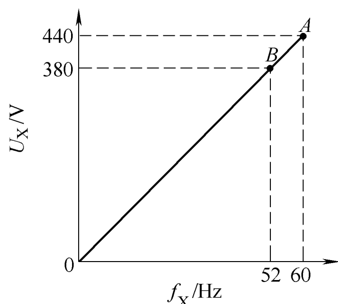


图 7-12　决定基本频率

7.4　重力负载的变频调速

问题 25　什么是重力负载？在变频调速时有些什么特点？

1. 重力负载的含义　指负载本身具有重力加速度，在运行过程中，容易使电动机转子的转速因超过同步转速而处于再生制动状态。例如，向下传输物料的带式输送机、商场中的下行电梯以及起重机械等。

2. 重力负载拖动系统的主要特点

（1）向下传输的运行特点　当传输机向下传输物料时，由于物料具有带动传输带向下运动的分力，如图 7-13 中之 F。因此，在物料

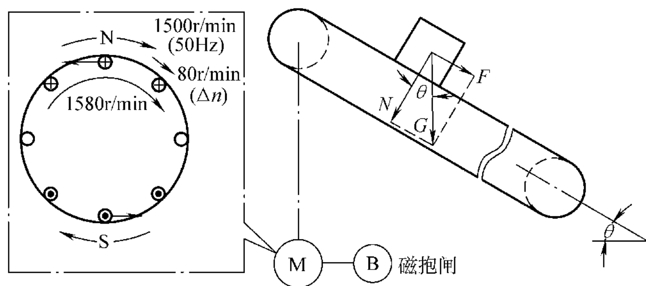


图 7-13　向下传输的特点

较重时，电动机转子的转速将超过旋转磁场的同步转速，使电动机处于再生制动状态，如图中虚线框内所示。这时，电动机的电磁转矩是和运动方向相反的，其作用是阻止传输带不断地加速下降。

（2）电动机的特点　在电动机减速停机时，即使变频器的输出频率已经下降为 0Hz，传输带很可能因为物料重力加速度的作用而停不住。为此，应选用具有附加制动电磁铁的“电磁制动电动机”，如图 7-14 所示。图中，VD1 用于进行半波整流；VD2 用于在负半周为线圈 YB 提供电流回路；压敏电阻 R_{V1}用于保护线圈 YB；R_{V2}用于保护二极管 VD2。

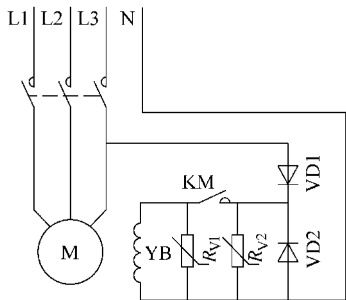


图 7-14　电磁制动电动机

3. 重力负载实行变频调速的要点

（1）关于制动电阻的选择　重力负载向下运行时，由于整个运行过程都处于再生制动状态，制动电路将基本上长期处于接通状态。因此，在决定制动电阻的容量时，修正系数通常取 $\alpha_B = 0.85$（即 $P_B = 0.85P_{B0}$）。

（2）注意变频器输出频率与制动电磁铁之间的配合　因为制动电磁铁的抱紧与松开是需要时间的，所以，为了做到准确停机，必须防止拖动系统在抱紧与松开过程中的滑行。尤其是起重机械，防止重物在抱紧与松开过程中的“溜钩”是十分重要的。

问题 26　有一台向下传输石料的传输机，倾斜角约为 30°。电动机数据：22kW，42.5A，1470r/min。改为变频调速后，怎样计算制动电阻？

向下传输的特点如图 7-13 所示，由于重物本身有一个向下运动的分力，所以，在运行的全过程中，电动机的转速都将超过同步转速，而处于再生制动状态。因此，加入制动电阻和制动单元是必须的。

制动电阻的计算如下：

1. 电阻值　因为倾斜角只有 30°，所以，制动转矩不必很大。但考虑到在传输石料的过程中，有时有过载的可能性，故取：

$$T_B = T_{MN}$$

式中　T_B——制动转矩；

T_{MN}——电动机的额定转矩。

由第3章的式（3-3），制动电流为

$$I_B = \frac{I_{MN}}{2} = \frac{42.5}{2} = 21.25A$$

取　$I_B = 20A$

则制动电阻的电阻值为

$$R_B = \frac{U_D}{I_B} = \frac{700}{20} = 35\Omega$$

2. 制动电阻的容量　因为传输机在整个运行过程中，都处于再生制动状态。所以，制动电阻的容量应直接按接入电路时的消耗功率来选择（即 $\alpha_B = 1$）：

$$P_B = \frac{700^2}{35} = 14000W = 14kW$$

问题27　向下传输石料的传输机，变频器的工作怎样与电磁制动器配合？

1. 基本思想　电磁制动器的松开（通电）和抱紧（断电）都在电动机低速运行时进行（见图7-15）。

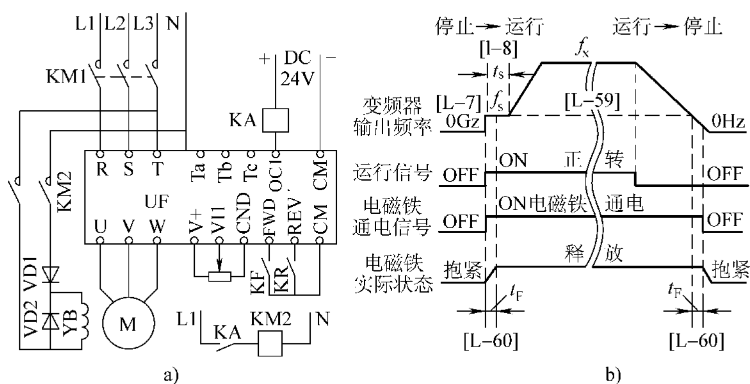


图7-15　电磁制动器和电动机的配合

a）控制示意图　b）动作时序图

2. 参考方法　以选用康沃 CVF—G2 变频器为例（见图 a），说明如下：

（1）功能预置　由功能码［L—7］预置起动频率 f_S；

由功能码［L—8］预置起动频率保持时间 t_S；

将功能码［b—15］预置为“2”，使输出端子 OC1 输出“频率水平检测信号”；

由功能码［L—59］预置检测频率的大小（f_{DT}），该频率可等于起动频率（$f_{DT}=f_S$）；

由功能码［L—60］预置 FDT 的延迟时间 t_F。

t_F 和 t_S 只需略大于电磁制动器的松开或抱紧时间（通常≤0.6s）即可。

（2）起动过程　由于 $f_{DT}=f_S$，所以，当继电器 KF 闭合，电动机刚开始起动时，输出端子 OC1 便有信号，继电器 KA 和接触器 KM2 相继得电，电磁制动器开始松开。由于变频器的输出频率和电压都很低，故松开过程中不会产生大电流。

待电磁制动器完全松开后，变频器的起动频率保持时间结束，输出频率开始上升，电动机升速到给定频率运行。在向下传输时，惯性问题几乎不存在。所以，加速时间可以预置得短一些。

（3）停机过程　继电器 KF 的触点断开，电动机开始降速。由于电动机本来就处于再生制动状态，如果频率下降太快，会增大泵升电压。所以，减速时间应预置得长一些。当频率下降到检测频率 f_{DT}，并延时 t_F 后（这时，变频器的输出频率尚未降到 0Hz），端子 OC1 断开，继电器 KA 和接触器 KM2 相继断电，电磁制动器开始抱紧。以上过程见图 b。

问题 28　起重机械进行变频调速时，怎样防止“溜钩”？

上述变频器的输出频率与制动电磁铁的配合控制也可以用于防止起重机械的溜钩。

但由于起重机械是垂直运动，控制不好容易发生严重事故。所以对于防止溜钩控制的要求更为严格。一般建议，起重机械采用变频调速时，应选择有反馈矢量控制方式，即使变频器的输出频率为 0Hz 也能维持足够大的转矩，称为零速转矩。

今以安川 G7A 系列变频器为例，说明其工作情况如图 7-16 所示。

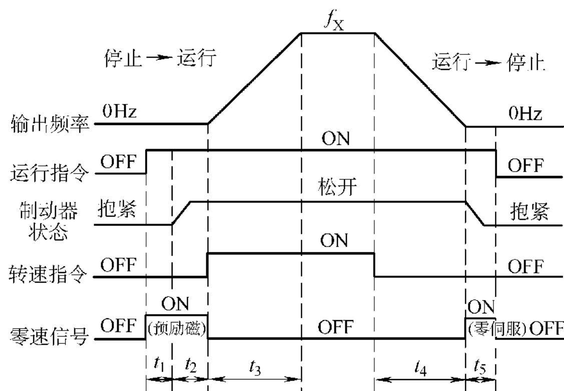


图7-16　安川变频器的防溜钩控制

1. 从停止到运行的控制

（1）当操作者发出运行指令后，变频器发出零速信号，使电动机处于“预励磁”状态，产生零速转矩；

（2）延时 t_1 后，向制动器发出“松开”指令；

（3）延时 t_2，确保制动器已经松开后，转速指令有效，频率开始上升到运行频率 f_X，上升时间为 t_3。

2. 从运行到停止的控制

（1）操作者发出停止指令，频率开始下降，下降时间为 t_4；

（2）频率下降到0Hz时，变频器再次发出零速信号，使电动机处于“零伺服”状态，维持零速转矩。与此同时，向制动器发出抱紧指令；

（3）延时 t_5，确保制动器已经抱紧后，撤消运行指令。

问题29　怎样防止变频器跳闸时的溜钩或滑行?

1. 跳闸引起溜钩的原因　变频器跳闸后，其逆变电路处于封锁状态，变频器也应迅速脱离电源。在这种情况下，电动机将处于自由制动状态，溜钩或滑行是很难避免的。

2. 防止溜钩的途径　为了解决这个问题，可采取外加直流电源，在变频器跳闸时，由外加的直流电源进行直流制动。与此同时，电磁制动器因断电而抱紧。待抱紧后，利用电磁制动器上的行程开关将直流电源切断，如图 7-17 所示。

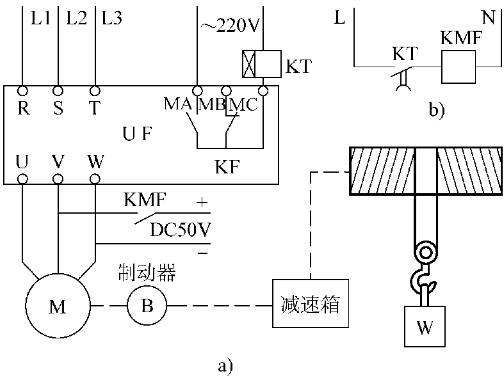


图 7-17　跳闸防溜钩
a）变频拖动系统　b）控制电路

当变频器跳闸时，一方面，报警输出端子的动断触点 MA—MB 断开，使接通变频器和电磁制动器电源的接触器断电；另一方面，报警输出端子的动合触点 MA—MC 闭合，时间继电器 KT 得电，使接触器 KMF 得电，将外部的直流电源通入电动机，使电动机进行直流制动。同时，切断电磁制动器的电源（图中未画出），使电磁制动器抱紧。

3. EDB 型跳闸防下滑装置　根据上述原理，已经有专门开发的“EDB 型跳闸防下滑装置”，其外部接线如图 7-18 所示。

（1）EDB 的接线图　如图 7-18，端子 L、N 接 220V 交流电源；端子 KF1、KF2 接变频器报警输出的动合触点；端子 U、V、W 接变频器的输出端，或电动机的进线端，其中，端子 V 与 W 之间有一个短路片，用户可根据电动机绕组的接法决定是否需要拆除。但应注意，短路片拆除后端子 W 将是空端。

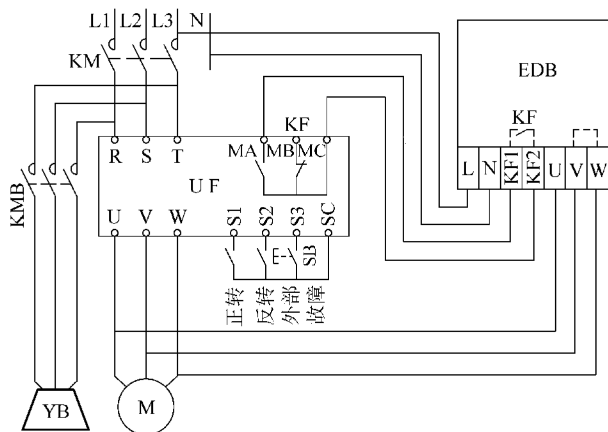


图 7-18　EDB 的外部接线

一般说来，当电动机的定子绕组为 Y 形接法时，短路片以接上为好，通入直流电流时的电路如图 7-19a 所示；当电动机的定子绕组为 Δ 形接法时，短路片以拆除为好，通入直流电流时的电路如图 7-19b 所示。

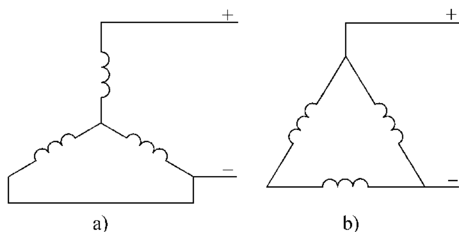


图 7-19　直流制动的接法

a）绕组为 Y 接法　b）绕组为△接法

（2）EDB 用于紧急停机　图 7-17 表明，吊钩每次从运行到停止的过程中，都需要有一定的时间。但有时情况比较紧急，要求吊钩能够在空中立即停住。

EDB 防溜钩装置可以比较容易地解决这个问题。只需在变频器的“外部故障”输入端子处接入一个按钮开关 SB。则当需要紧急停机时，按下 SB，变频器便立即因“外部故障”而跳闸，并因接入外部直流电源而迅速停住。

但必须注意：

1）紧急停机只有在变频器跳闸，逆变管已被封锁的情况下进行，如果变频器未跳闸，逆变管未封锁，则外加直流电压时，逆变管

有被损坏的可能。

2）由于变频器跳闸后，电源接触器 KM 必须断开，再次起动时，须先接通 KM，操作比较复杂，故正常情况下，不宜采用这种方法来停机。

7.5　恒功率负载的变频调速

问题 30　什么是恒功率负载？主要特点是什么？

1. 恒功率负载的含义　所谓恒功率负载，是指在调节转速的过程中，负载的功率不变。

其典型代表如各种卷绕机械，其基本结构和工作情况如图 7-20a 所示。

2. 特点分析

（1）功率特点　薄膜在卷绕过程中，要求被卷物的张力 F 必须保持恒定。为了保持张力恒定，必须使被卷绕物的线速度 v 保持恒定。所以，在不同的转速下，负载的功率基本恒定：

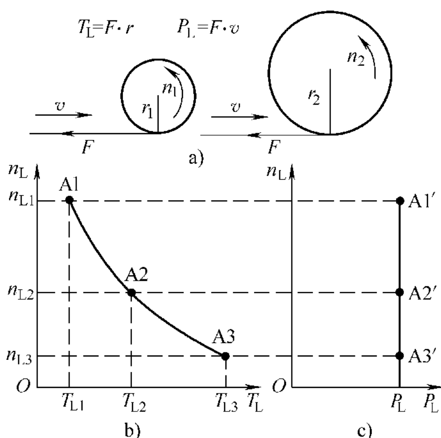


图 7-20　恒功率负载及其特性

a）薄膜卷取　b）机械特性　c）功率特性

$$P_L = Fv = \text{const}$$

式中　F——被卷物的张力（N）；

v——被卷物的线速度（m/min）。

很明显，在卷绕过程中，为了保持线速度恒定，随着卷绕物半径的增大，负载的转速必须减小。就是说，转速的高低是随被卷物的卷径而变的。但负载的功率却是不变的，其功率特性曲线如图 7-20c 所示。

（2）阻转矩的构成与特点　如图所示，负载的阻力就是被卷物的张力 F，作用半径是被卷物的半径 r。即

$$T_L = Fr \tag{7-12}$$

式中　r——卷绕物的卷绕半径（m）。

十分明显的是，随着卷绕辊半径 r 的增大，负载转矩也随之增大。另一方面，由于要求线速度 v 保持恒定，在卷绕半径 r 不断增大的同时，转速 n_L 必将不断减小。

根据负载的机械功率 P_L 和转矩 T_L、转速 n_L 之间的关系，有

$$T_L = \frac{9550P_L}{n_L} \tag{7-13}$$

即，负载阻转矩的大小与转速成反比，其机械特性如图 7-20b 所示。

问题 31　恒功率负载配用的电动机总要比负载所需功率大得多，为什么?

以某卷取机为例，说明如下：

负载的转速范围为（32～320）r/min，电动机的额定转速为 960r/min，传动比 $\lambda=3$。卷绕过程的示意图如图 7-21a 所示。其机械特性如图 b 的曲线①所示。

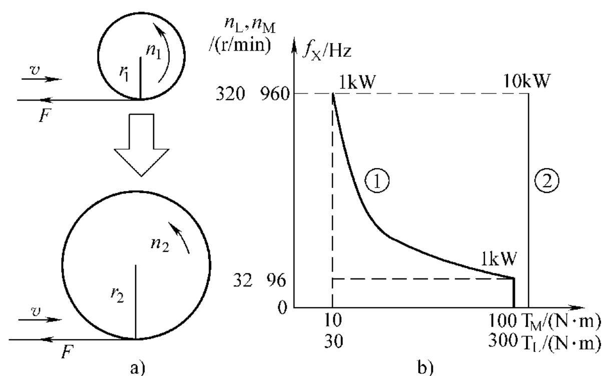


图 7-21　电动机拖动恒功率负载

a）卷绕示意图　b）功率特点

1. 负载功率

（1）最高转速时

∵ $$T_L = 30\text{N} \cdot \text{m}$$

$$n_L = 320\ \text{r/min}$$

∴ $$P_L = \frac{30 \times 320}{9550} \approx 1.0\text{kW}$$

（2）最低转速时

∵ $$T_L = 300\ \text{N} \cdot \text{m}$$

$$n_L = 32\text{r/min}$$

∴ $$P_L = \frac{300 \times 32}{9550} \approx 1.0\text{kW}$$

2. 所需电动机的容量

∵　电动机的额定转矩必须能够带动负载的最大转矩

$$T_{MN} \geqslant T'_{Lmax} = 100\ \text{N} \cdot \text{m}$$

同时，电动机的额定转速又必须满足负载的最高转速

$$n_{MN} \geqslant n'_{Lmax} = 960\ \text{r/min}$$

所以电动机的容量应满足：

$$P_{MN} \geqslant \frac{100 \times 960}{9550}\text{kW} \approx 10\text{kW}$$

选 $$P_{MN} = 11\text{kW}$$

可见，所选电动机的容量比负载所需功率增大了 10 倍。

问题 32　怎样减小恒功率负载配用的电动机功率？

1. 基本考虑　电动机在 $f_X > f_N$ 时的有效转矩线也具有恒功率性质，应考虑尽量利用电动机调速过程中的恒功率区来带动恒功率负载，使两者的特性比较吻合。

2. 频率范围扩展至 $f_X \leqslant 2f_N$ 时的系统容量　因为电动机的最高转速比原来增大了一倍，则传动比 λ' 也必增大一倍，为 $\lambda' = 6$。电动机的有效转矩线如图 7-22a 中之曲线②′所示。其计算结果如下：

（1）电动机的额定转矩　因为 $\lambda' = 6$，所以电动机轴上的转矩（即负载转矩的折算值）减小了一半：

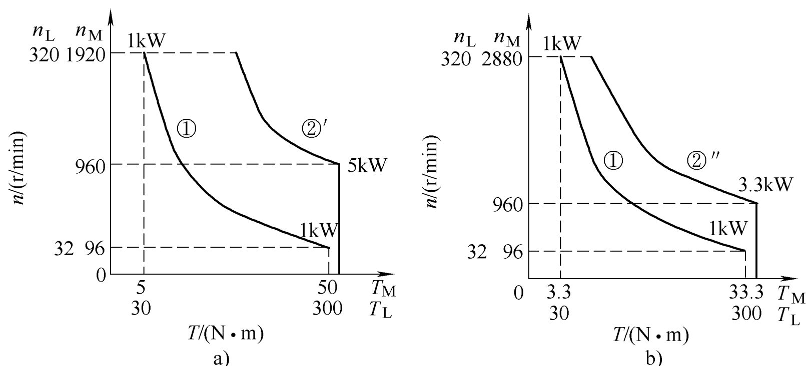


图 7-22 额定频率以上带卷绕机械

a）最高频率为 $2f_N$ b）最高频率为 $3f_N$

$$T_{MN} \geqslant T'_{Lmax} = 50\text{N} \cdot \text{m}$$

（2）电动机的额定转速 仍为 960 r/min

（3）电动机的功率

$$P_{MN} \geqslant \frac{50 \times 960}{9550}\text{kW} \approx 5\text{kW}$$

取 $$P_{MN} = 5.5\text{kW}$$

可见，所需电动机的功率减小了一半，但仍比负载功率大了许多。

3. 频率范围扩展至 $f_X \leqslant 3f_N$ 时的系统功率 这时传动比 λ''应增大为 $\lambda'' = 9$。电动机的有效转矩线如图 7-22b 中之曲线②″所示。其计算结果如下：

（1）电动机的额定转矩 因为 $\lambda'' = 9$，所以电动机轴上的转矩（即负载转矩的折算值）减小为

$$T_{MN} \geqslant T''_{Lmax} = 33.3\text{N} \cdot \text{m}$$

（2）电动机的额定转速 仍为 960 r/min

（3）电动机的功率

$$P_{MN} \geqslant \frac{33.3 \times 960}{9550}\text{kW} \approx 3.3\text{kW}$$

取
$$P_{MN}=3.7\text{kW}$$

可见，所需电动机的功率进一步减小了。

由于电动机的工作频率过高，会引起轴承及传动机构磨损的增加，故对于卷取机一类的必须连续调速的机械来说，电力拖动系统的功率已经不大可能进一步减小了。

问题 33　变频调速的最大工作频率以多大为宜？

就电动机而言，高速运行时，散热条件变好，一般不存在发热问题。需要注意的主要是机械方面的问题，如：

（1）国产通用电动机的轴承能够承受的最高转速约为 4000r/min 多，因此变频调速后长时间运行的最高转速不应超过此值。

（2）应考虑高速运行时转子的动平衡问题。国内各电机厂的动平衡试验大多在 3000r/min 的状态下进行。因此，变频调速后长时间运行的最高转速不宜超过此值。

（3）输出轴的抗振动能力，等。

实际应用中，最高工作频率又和负载的性质有关，说明如下：

1. 恒转矩负载　因为电动机在额定频率以上运行时，有效转矩要减小。所以，前提条件是电动机的有效转矩必须不小于负载的折算转矩

$$T_{ME}\geqslant T_L'$$

由此而推导出允许的最高工作频率

$$f_{max}\leqslant f_N/\xi \tag{7-14}$$

式中　f_{max}——允许的最高工作频率（Hz）；

f_N——电动机的额定频率（Hz）；

ξ——电动机的负载率。

式（7-14）表明，在满负载运行时，最高工作频率不能超过额定频率。当负载率较小时，最高工作频率可以适当提高。

2. 恒功率负载　又分两种情况：

（1）长期不变负载　如金属切削机床需要在最高速时进行长时间切削。对于这类负载，主要考虑的是上述的机械因素。

（2）变动负载　典型例子是卷绕机械。卷绕机械在最高速时滞留的时间极短，随着卷径的迅速增大，转速下降得也很快。对于这类

负载，据目前看到的资料所载，最高工作频率可达 180Hz。

3. 二次方律负载　这类负载在额定转速以上运行时，负载转矩将大幅增加，而电动机的有效转矩则反而减小。所以，最高工作频率只能是额定频率。

7.6　卷绕机械的恒张力控制

问题 34　磁粉离合器是怎样工作的？

许多年来，磁粉离合器被认为是控制卷绕机械的比较理想的设备。所以，应该对磁粉离合器有比较清楚的了解。

磁粉离合器的输入轴称为主动轴，可以和电动机的轴直接对接，也可以和减速器的输出轴对接；输出轴是从动轴，和卷绕机械相连接。输入轴和输出轴之间依靠磁粉相连接，磁粉离合器的固定部分由励磁绕组和磁钢构成，如图 7-23 所示。

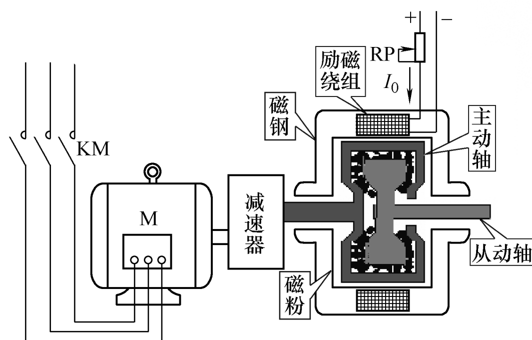


图 7-23　磁粉离合器剖面图

当励磁绕组中通入励磁电流后，所产生磁通的路径如图中的虚线所示。该磁通使磁粉同时吸附在输入轴和输出轴上，从而将输入轴上的转矩传递给输出轴。励磁电流小，磁粉的吸附力弱，输出轴上的转矩也小；反之，励磁电流大，磁粉的吸附力强，输出轴上的转矩就大。所以，输出轴转矩 T_0 的大小是和励磁电流 I_0 成正比的。

因此，磁粉离合器控制的实质是进行转矩控制。

问题 35　磁粉离合器怎样实现恒张力控制？

如图 7-24 所示，曲线①是磁粉离合器的输出转矩，只要励磁电流不变，输出轴上的转矩也就不变。而卷绕辊的阻转矩却是随着卷绕直径的增大而增大的，如曲线②所示。

因为前面的单元不断地将薄膜以一定的线速度送过来。所以，当负载转矩超过了磁粉离合器的输出转矩时，机器不会停下来，而只是使卷绕辊的转速减慢，如图中的曲线③所示。

所以，卷绕辊的速度具有恒功率的特点。在 t_1 时刻以前，负载转矩小于磁粉离合器的输出转矩，电力拖动系统将不断加速，一直加速到最高转速。t_1 时刻以后，随着卷径的不断增大，转速就逐渐慢下来了。

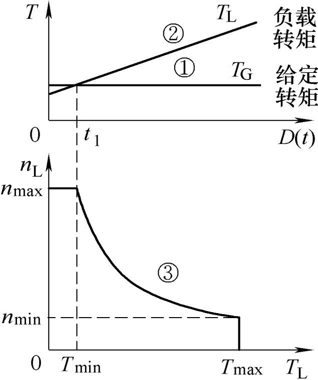


图 7-24　转矩控制特点

问题 36　什么是变频器的转矩控制功能？

恒张力控制的专用变频器，在矢量控制模式中，都设置了‘转矩控制’功能。这和 ABB 变频器的‘直接转矩控制’是不相同的两回事。举一个不恰当的比喻，ABB 的“直接转矩控制”与矢量控制是“兄弟”关系，而这里所说的“转矩控制”是矢量控制下的一种控制方式，是矢量控制的“儿子”，两者不属于同一个等级。

确切地说，ABB 变频器的‘直接转矩控制’是通过不断调整电动机的定子电压，来保持电动机的转速稳定的，从根本上说，控制的是转速。而矢量控制方式下的“转矩控制”，则是使电动机轴上的转矩 T_M 与给定信号 U_G 相对应，控制的是转矩。

以深圳兰海华腾公司生产的 V6—H 系列变频器为例，当功能码 Pd. 00 预置为“0”时，变频器实施的是转速控制，特点是变频器的输出频率 f_X 与给定信号 U_G 相对应，如图 7-25a 所示；而当功能码 Pd. 00 预置为“1”时，变频器实施的是转矩控制，特点是变频器将使电动机轴上的电磁转矩与给定信号 U_G 相对应，如图 7-25b 所示。

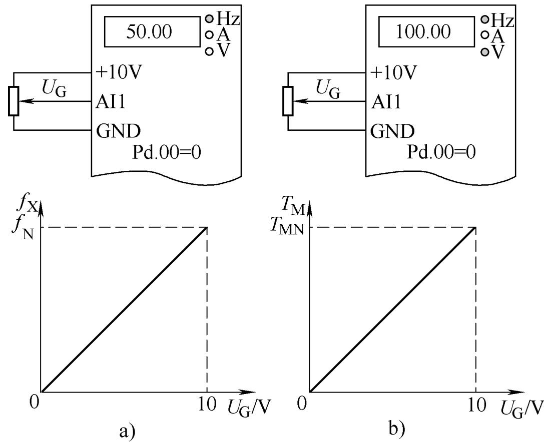


图 7-25　变频器的转速控制和转矩控制
a）转速控制　b）转矩控制

所以，变频器的转矩控制功能与磁粉离合器控制功能相同，可以取代磁粉离合器，并且比磁粉离合器优越。

问题 37　怎样利用转矩控制功能实现恒张力控制？

仍以 V6—H 系列变频器为例，基本控制电路如图 7-26 所示。

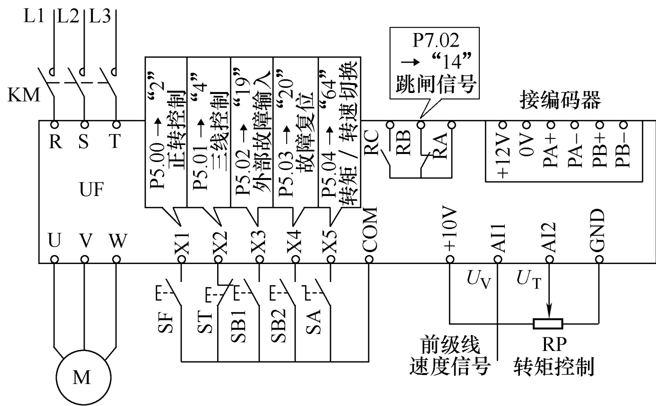


图 7-26　卷绕机械的转矩控制

变频器输入端子中的 X1 预置为“正转控制”，由按钮 SF 起动电动机；X2 预置为“三线控制”，即自锁，由按钮 ST 切断自锁，使电动机停机；X3 预置为“外部故障输入”，用作紧急停机；X4 预置为“故障复位”即由外接端子进行复位。

功能码 Pd. 00 预置为“1”，使变频器的转矩控制功能有效，转矩控制信号由电位器 RP 提供，从 AI2 端输入。

因为转矩控制不能控制转速，但线速度不应该无限制上升。通常，是把前面单元的线速度信号从 AI1 端输入，作为线速度的上限。此外，需要注意的是：因为转矩控制是矢量控制模式下的一种控制方式，因此必须进行电动机参数的自动测量。

问题 38　怎样利用闭环控制实现恒张力控制？

卷绕机械也可以通过变频器的 PID 调节功能实现恒张力控制，今选用森兰 SB70 系列变频器，如图 7-27 所示。

图 7-27　卷绕机械的闭环控制

AI1 是张力给定的目标值输入通道，通过跳线选择，使之接收电压信号；AI2 是反馈信号通道，通过跳线选择，使之接收由张力传感器 ST 输入的电流信号。变频器预置为 PID 功能“有效”，适当预置 P、I、D 的数据，就可以实现高精度的恒张力控制了。

许多卷绕机械都要求锥度控制，就是“越卷越松”，以免在开卷时发生层与层之间的粘连。实现锥度控制的具体方法是在卷绕过程中逐渐减小张力的目标值。在图 7-26 中，由于电容器 C1 的不断充电，

A 点的电位将不断降低，从而使从 RP1 得到的目标信号不断减小。A 点电位的调节范围由电位器 RP2 决定，从而决定了锥度的大小。

有的卷绕机械并不是一开始卷绕就需要锥度控制的，而是卷绕到一定阶段后才开始需要锥度控制的，旋钮开关 SA 就是用来控制要不要锥度控制的。当 SA 闭合时，没有锥度控制；当断开 SA 时，就有锥度控制。

7.7　金属切削机床的变频调速

问题 39　金属切削机床的机械特性是怎样的?

大部分金属切削机床都属于恒转矩和恒功率混合的负载，其主要特点是：

1. 机械特性的特点　以卧式车床为例，负载的阻转矩如图 7-28 中虚线框内所示，等于切削力和工件半径的乘积：

$$T_L = Fr$$

式中　F——切削力（N）；

　　　r——工件的半径（m）。

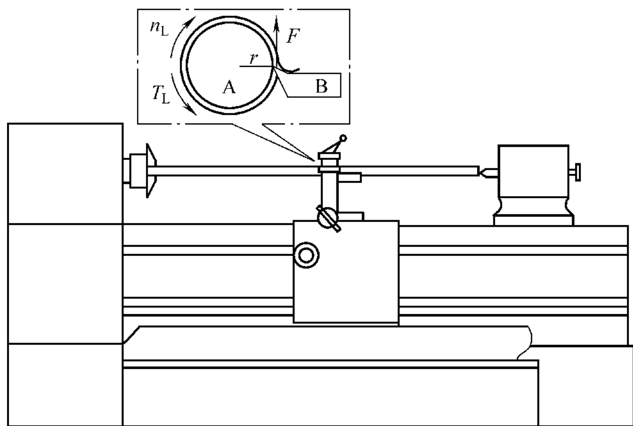


图 7-28　车床的外形与阻转矩

在切削深度和进刀速度不变的情况下，切削力 F 主要与切削的线速度成正比。因此，工件的转速越高，负载的阻转矩也越大。

但实际上，由于受到刀具和机床床身强度的限制，要求在大部分调速范围内，切削功率保持恒定。因此，其机械特性具有恒功率的性质。

但在低速段，则因为切削力 F 要受到限制，故机械特性具有恒转矩的特点。所以，金属切削机床的机械特性属于恒转矩和恒功率混合的特性，如图 7-29 所示。

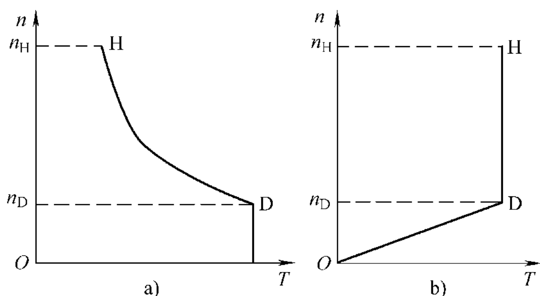


图 7-29　机床的机械特性

a）机械特性　b）功率特性

2. 计算转速　恒转矩区和恒功率区的分界转速，称为计算转速，用 n_D 表示。

关于计算转速 n_D 大小的规定因机床的种类不同而不同，如：

在老系列车床中，一般规定：从最低转速起，以全部转速挡数的 1/3 的最高转速作为计算转速。

例如，CA6140 型卧式车床主轴的转速共分 24 级：n_1、n_2、n_3、…、n_{24}，则第 8 挡转速（n_8）为计算转速。

但随着刀具强度和切削技术的提高，计算转速已经大为提高。近年来，在一些新系列车床中，已逐渐提高为以最高转速的（1/4～1/2）作为计算转速：

$$n_D \approx \frac{n_{max}}{2 \sim 4} \tag{7-15}$$

由于迄今为止，大部分金属切削机床都采用齿轮调速，故说明书中一般不提及计算转速。

在龙门刨床中，由于较早采用电动机调速，故说明书中常有明确规定。例如，A 系列龙门刨床规定，计算（分界）刨削速度为 v_D = 25m/min（最高刨削速度为 v_{max} = 90 m/min），即刨削速度 $v_D \leq 25$m/min 时，为恒转矩调速；$v_D > 25$m/min 时，为恒功率调速。

问题 40　金属切削机床对调速性能有些什么要求?

1. 调速特点　金属切削机床的转速调节，通常是在停机情况下进行的，在切削过程中，一般不进行转速调节。

2. 对调速的要求

（1）调速范围　金属切削机床的调速范围一般较宽，通常在 1∶20以上；超过 1∶100 的也并不罕见。

（2）对机械特性的要求　金属切削机床要求有较硬的机械特性。就是说，当负载转矩有变化时，要求转速基本不变。

（3）对动态响应的要求　金属切削机床在运行过程中，当转速因遇到突变负载（例如切削过程中遇到“砂眼”等）而改变时，要求能迅速恢复到原来的转速，故对动态响应的要求较高。

问题 41　金属切削机床实现变频调速时有哪些主要特点?

1. 控制方式　根据上述对金属切削机床调速的要求，在实现变频调速时，最好选择有反馈的矢量控制方式。

2. 频率范围　由于金属切削机床在大部分转速范围内，具有恒功率调速的特点，因此应尽量利用额定频率以上的部分。

3. 传动比　根据金属切削机床停机调速的特点，传动比可以考虑分成两挡或多挡，使变频调速后的有效转矩线尽量逼近负载的机械特性曲线。以某车床为例，如图 7-30 所示，为了便于观察，各轴上的转矩都折算到负载轴上。图中，曲线①是车床的机械特性；曲线②是低速段变频调速后的有效转矩线；曲线③是高速段变频调速后的有效转矩线。由图可知，电动机的有效转矩线与负载的机械特性曲线十分接近。这样做的目的，是可以使电力拖动系统的容量尽量地接近负载实际所需的容量。

4. 加、减速时间　金属切削机床通常要求能够频繁地起动和制动，并且起动与制动的时间要求尽量地短。为此，通常的方法是：

（1）变频器的容量可加大一挡；

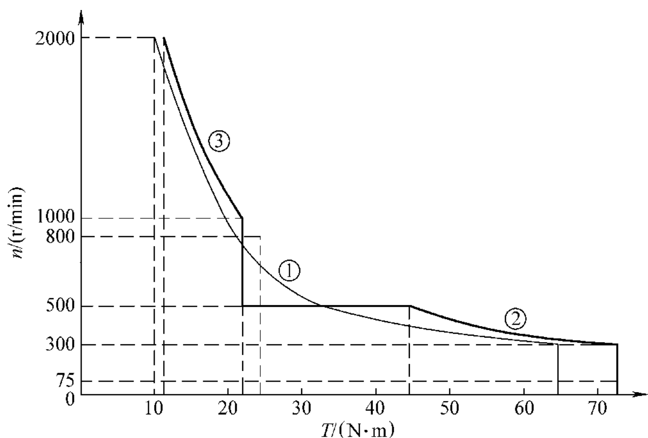


图 7-30　$f_X \leqslant 2f_N$，两挡传动比机床

（2）应配置制动电阻和制动单元。

5. V/F 控制的要点　如果变频器无矢量控制功能，只能用 V/F 控制方式的话，则在预置 U/f 比时，必须注意：

（1）机床在切削过程中，负载的阻转矩较大，需要加大 U/f 比；

（2）每次切削完毕后退刀时，负载的阻转矩突然减轻为空载，已经加大了的 U/f 比很可能使电动机的磁路饱和而导致过电流跳闸。

因此，在调试过程中，必须反复预置 U/f 比，要做到：切削过程中能带得动，退刀后又不跳闸。

问题 42　某精密车床有 8 挡转速，分别是：75、120、200、300、500、800、1200、2000r/min，300r/min 为计算转速，电动机数据：2.2kW、1420 r/min，5.0A，怎样实现变频调速？

计算出电动机的额定转矩：

$$n_{MN} = \frac{9550P_{MN}}{n_{MN}} = \frac{9550 \times 2.2}{1420}\text{N} \cdot \text{m} = 14.8\text{N} \cdot \text{m}$$

负载的实际功率按 2 kW 计算，则各挡转速下负载转矩的计算结果见表 7-1。

表 7-1　各挡转速下的实际负载转矩

挡位	1	2	3	4	5	6	7	8
转速/(r/min)	75	120	200	300	500	800	1200	2000
转矩/(N·m)	63.7	63.7	63.7	63.7	38.2	23.9	15.9	9.55

如上述，采用两挡传动比，能够实现变频调速。

问题 43　怎样计算低速挡的传动比？

在低速挡，额定频率 50Hz 应该和恒转矩区的最高转速（300 r/min）相对应。所以，低速挡的传动比 λ_L 应该是

$$\lambda_L = \frac{1500}{300} = 5$$

问题 44　怎样计算高速挡的传动比？

在高速挡，首先确定最高运行频率为 100Hz，则额定频率 50Hz 应该和负载最高转速的一半（1000 r/min）相对应，所以有

$$\lambda_H = \frac{1500}{1000} = 1.5$$

问题 45　某立式车床用 Y-△起动，起动和制动比较频繁，常烧接触器。想改为变频调速，须注意些什么？

1. 注意调速范围　立式车床的调速范围通常较大，故应考虑：

（1）控制方式　应选用有反馈的矢量控制方式，调速范围才有可能得到满足；

（2）散热问题　必须注意在最低速时的电动机散热问题，否则将影响调速范围。

2. 注意变频器容量　因为立式车床非但起动和制动频繁，且要求尽量缩短起动时间和制动时间，起动电流较大，故变频器以加大一挡为宜。制动时因为可以加入制动电阻和制动单元，并不存在问题。

3. 注意调整传动比　金属切削机床的机械特性如上述：低速段是恒转矩的；高速段是恒功率的。因此，如果适当加大传动比，将电动机的工作频率提高到（70～100）Hz 的话，则可使起动和制动过程变得比较容易，原因如下：

（1）同样从 0Hz 加速到 50Hz，机床转速的上升幅度减小了；

（2）加大传动比以后，折算到电动机轴上的飞轮力矩将大幅减

小，从而使起动和制动过程变得容易。

问题 46　龙门刨床是怎样构成的?

龙门刨床主要用来加工机床床身、箱体、横梁、立柱、导轨等大型机件的水平面、垂直面、倾斜面以及导轨面等，是重要的工作母机之一。

1. 龙门刨床的构造

龙门刨床主要由七个部分组成，如图 7-31a 所示。

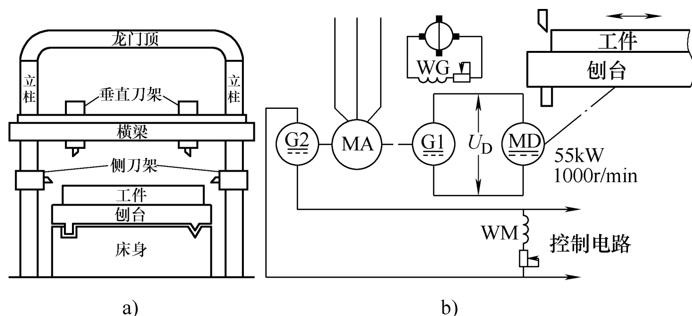


图 7-31　龙门刨床结构图

a）龙门刨床的构造　b）刨台的电力拖动系统

（1）床身　是一个箱形体，上有 V 形和 U 形导轨，用于安置工作台。

（2）刨台　也叫工作台，用于安置工件。下有传动机构，可顺着床身的导轨做往复运动。

（3）横梁　用于安置垂直刀架。在切削过程中严禁移动，仅在更换工件时移动，用以调整刀架的高度。

（4）垂直刀架　安装在横梁上，可沿水平方向移动，刨刀也可沿刀架本身的导轨垂直移动。

（5）左右侧刀架　安置在立柱上，可上、下移动。

（6）立柱　用于安置横梁及侧刀架。

（7）龙门顶　用于紧固立柱。

2. 刨台的原电力拖动系统　如图 7-31b 所示，刨台由直流电动机 MD 拖动，MD 由直流发电机 G1 供电，G1 的原动机是三相交流异步电动机 MA，MA 还同时拖动一台励磁发电机 G2。G2 发出的直流电，

一方面为 MD 和 G1 提供励磁电流，同时也为控制电路提供电源。

A 系列龙门刨床的最低刨削速度是 4.5m/min，最高刨削速度是 90 m/min，调速范围为 20。直流电动机数据是：55 kW，1000 r/min。

为了提高电动机的工作效率，龙门刨床采取两级齿轮变速箱变速的机电联合调速方法。即：45 m/min 以下为低速挡，45 m/min 以上为高速挡。

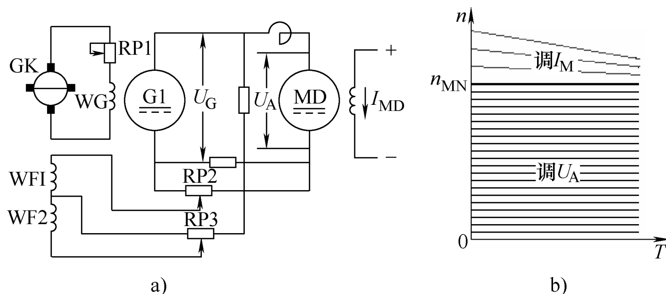


图 7-32　刨台的直流调速系统简图

a）直流调速系统主电路　b）调速机械特性

问题 47　龙门刨床原来的直流拖动系统有什么特点？

1. 直流调速概要　如图 7-32a 所示，直流电动机 MD 是通过调节电枢电压来调速的，电枢电压是由直流发电机 G1 提供的，直流发电机的励磁电流又是由交磁电机扩大机 GK 提供的。

交磁电机扩大机是一种具有放大作用，反映十分灵敏的特殊发电机。调节电位器 RP1，就调节了 G1 的励磁电流，也就调节了主电路的电压 U_G，从而调节了电动机的转速。

2. 电动机的机械特性　电动机在带负载后的转速是依靠电压负反馈和电流正反馈进行补偿的。

当负载增大时，电动机的电枢电流必增大，而电压 U_G 必有所下降，这些变化将改变交磁电机扩大机的补偿绕组 WF1 和 WF2 的电流，最终将使电动机的转速降落得到补偿，从而得到十分硬的机械特性曲线，如图 7-32b 所示。

十分明显的是，上述的电压负反馈和电流正反馈的作用，将不可能对电动机的励磁电流发生影响。所以，直流电动机在额定转速以上

调速时，其机械特性将变软，如图 7-32b 的上部所示。这部分的机械特性是不能用于刨削工件的。

所以，电动机的有效转矩线（折算到负载轴上）如图 7-33 所示，图中，曲线①是低速挡的负载机械特性，曲线②是高速挡的负载机械特性。曲线③是低速挡直流电动机的有效转矩线，由于传动机构的传动比较大，故折算到负载轴上的电动机转矩也较大；曲线④是高速挡直流电动机的有效转矩线，由于传动机构的传动比较小，故折算到负载轴上的电动机转矩也较小。

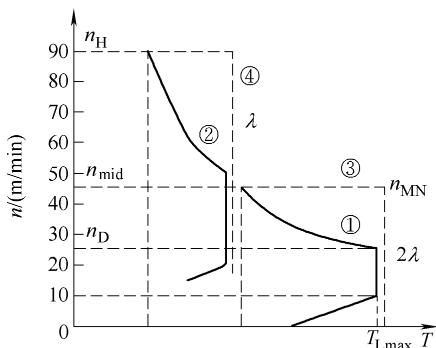


图 7-33　原电力拖动系统特性

3. 关于功率的计算　由图可以看出，负载所需功率 P_L 发生在以最大切削力切削和以计算转速运行之时，于是有

$$P_L = \frac{T_{Lmax} n_D}{9550} \tag{7-16}$$

式中　P_L——负载所需功率（kW）；

T_{Lmax}——负载在恒转矩区的最大转矩（N · m）；

n_D——计算转速，即恒转矩和恒功率特性分界点的转速（r/min）。

另一方面，电动机的额定转矩（折算到负载轴上）必须大于负载的最大转矩：

$$T'_{MN} \geqslant T_{Lmax}$$

而电动机的额定转速（折算到负载轴上）应该等于低速挡时的最高转速：

$$n'_{MN} = n_{mid}$$

所以，电动机的额定功率应该满足

$$P_{MND} \geqslant \frac{T_{Lmax} n_{mid}}{9550} \tag{7-17}$$

式中　P_{MND}——直流电动机的额定功率（kW）；

n_{mid}——负载的中间转速（低速挡时的最高转速）（r/min）。

两者比较的结果：

$$\frac{P_{MND}}{P_L}=\frac{n_{mid}}{n_D}=\frac{45}{25}=1.8$$

或
$$P_{MND}=1.8P_L$$

可见，在直流拖动系统中，电动机处于大马拉小车的状态。

问题48　龙门刨床的刨台电动机改造成变频调速时，电动机功率能减小吗？

可以的，因为变频调速在矢量控制时，异步电动机在额定频率以上的机械特性也是很硬的。这是它和直流电动机的主要区别。

如图7-34所示，电动机的额定频率如果对应于30r/min，则在45r/min时的工作频率为75Hz，电动机在各转速挡的有效转矩线（折算到负载轴上）如图中的曲线⑦和曲线⑧所示。而电动机的功率可减小为

$$P_{MN1}\geqslant P_{MND}\frac{30}{45}=60\times\frac{2}{3}\text{kW}$$
$$=40\text{kW}$$

选45kW电动机就够了。

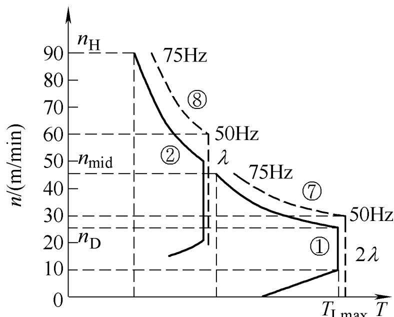


图7-34　变频调速的拖动特性

问题49　在选择龙门刨床变频器时，需注意些什么？

考虑到龙门刨床在刨削过程中，可能遇到冲击负载，如工件有较大的砂眼，所以变频器的容量以加大一挡为宜。

又如上述，龙门刨床的切削过程对机械特性有较高的要求。所以，应选用具有有反馈的矢量控制功能的高级变频器。

此外，因为刨台的惯性很大，必须考虑当变频器因故障而跳闸时，刨台可以迅速停住的问题。

问题50　龙门刨床刨台的往复周期是怎样的？

以国产A系列龙门刨床为例，其往复运动周期如图7-35所示。

图中，v为线速度，t为时间。各时间段（$t_1\sim t_5$）的工况如下：

（1）切入工件段　即刨台起动、刨刀切入工件的阶段（t_1段）。

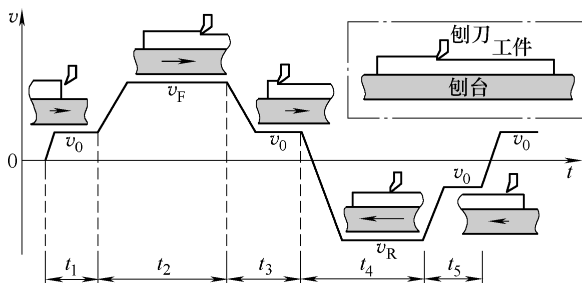


图 7-35　刨台的往复运动周期

在这一阶段，为了减小刨刀刚切入工件的瞬间刀具所受的冲击和防止工件被崩坏，故速度较低，为 v_0；

（2）正常切削段　刨刀切入工件后，刨台将加速至正常的刨削速度 v_F（t_2 段）；

（3）退出工件段　在切削行程即将结束，刨刀退出工件之前，为了防止在刨刀退出时，工件边缘被崩裂，故又将速度降低为 v_0（t_3 段）；

（4）高速返回段　返回过程是不切削工件的空行程，为了节省返回时间，提高工作效率，返回速度应尽可能高一些，设为 v_R（t_4 段）；

（5）缓冲段　返回行程即将结束、再反向到工作速度之前，为了减小刨台的动能，又应将速度降低为 v_0（t_5 段）；

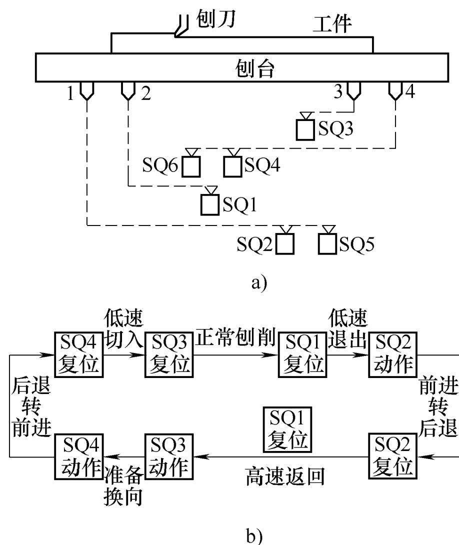


图 7-36　刨台的往复运动的实施

a）接近开关的布置　b）往复动作

之后，便进入下一周期，重复上述过程。

上述往复过程，是通过碰撞 6 个接近开关来实现的，如图 7-36

所示。

问题 51　龙门刨床的专用电子接近开关是如何构成的？

近年来，开发出了刨台专用电子接近开关，由于消除了机械碰撞，因而具有故障率低、使用寿命长等优点。

如图 7-37 所示，专用接近开关由 3 个接近开关 S1、S2、S3 组成，安装在刨床的床身上。其中，S1、S2 的感应头朝向外侧面，S3 的感应头则朝上，如图 7-37b 所示。

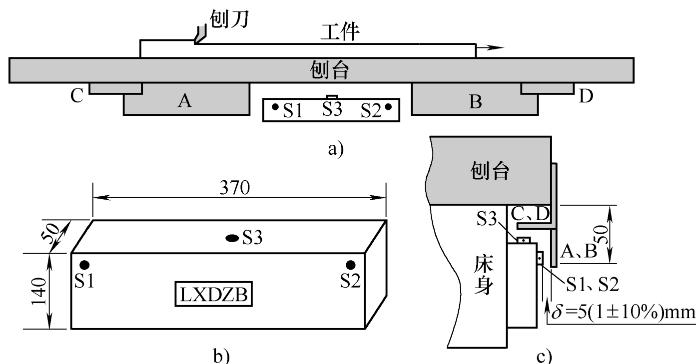


图 7-37　刨台专用电子接近开关

a）专用电子接近开关的布置　b）外观　c）安装侧视图

A、B 是两侧的感应挡板，C、D 为上挡极，其形状如图 7-37c 所示。挡板与感应头之间的距离为

$$\delta = 5\ (1 \pm 10\%)\ \text{mm}$$

问题 52　龙门刨床的专用接近开关如何工作？

接近开关的状态与输出端子的连接如图 7-38b 所示。

刨台的往复运行与接近开关的状态如图 7-38c 所示：

（1）在刨削过程和返回过程的中间，接近开关处于“0”状态。

（2）刨削快要结束时，挡板 A 接近 S1，接近开关处于“1”状态，使刨削速度降为低速，刨刀准备退出工件。

（3）挡板 A 又接近 S2，接近开关处于“11”状态，刨台降速为 0，刀架抬刀，接着刨台高速返回。

（4）在返回过程中，挡板 A 相继退出 S2 和 S1，接近开关又处于“0”状态。

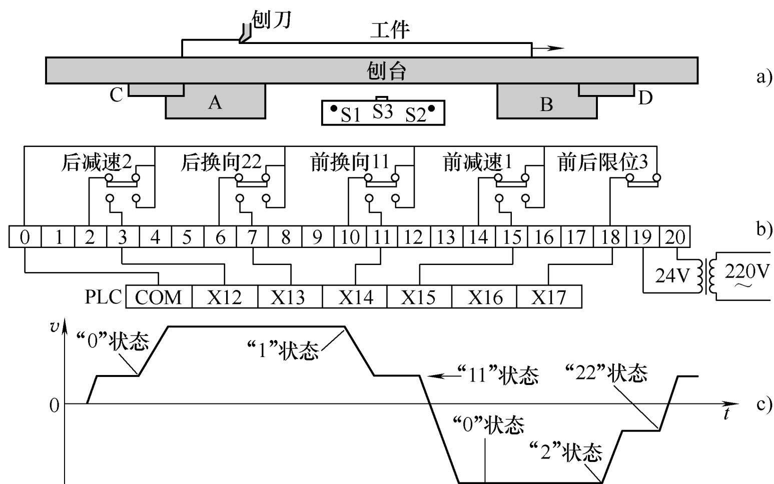


图 7-38　专用接近开关的工作程序

a）刨台示意图　b）接近开关电路　c）循环运行与接近开关

（5）返回快要结束时，挡板 B 接近 S2，接近开关处于“2”状态，使返回速度降为低速，作为刨台转换方向的缓冲。

（6）挡板 B 又接近 S1，接近开关处于“22”状态，刨台降速为 0，刀架进刀，然后刨台反向，刨刀低速切入工件。

（7）在切削过程中，挡板 B 相继退出 S1 和 S2，接近开关又处于“0”状态，刨台升速至刨削速度。

（8）如果刨台极限位置时不能及时反向，则上挡板 C 或 D 将接近 S3，迫使刨台停止运行。

问题 53　怎样预置龙门刨床刨台的加、减速时间?

刨台在往复过程中的加速与减速，分两种情况，加、减速时间也就有所区别。

（1）刨削过程中（由低速上升至刨削速度以及由刨削速度下降至低速）的加、减速，因为刨刀正在切削，加、减速不宜太快，故加、减速时间应预置得长一些，称为第 1 加、减速时间。

（2）非刨削过程中（正转起动、高速返回以及返回结束时的停止）的加、减速，因为不涉及工件，为了提高劳动生产率，加、减速过程应尽量地短，故加、减速时间应预置得短一些，称为第 2 加、

减速时间。

问题 54　怎样预置龙门刨床刨台的各挡转速？

由上述，刨台在往复过程中主要有三挡速度：

（1）刨削速度　在刨削工件时，刨削速度是根据被加工工件的材质和工艺要求等因素决定的。因此，刨削速度应可调。可以采用图 7-39 中的电位器 RP1 来调节。

（2）返回高速　返回高速应该根据被加工工件的重量而进行适当调整。重量重者应适当降低返回速度。所以，返回速度可由图 7-39 中的电位器 RP2 来调节。

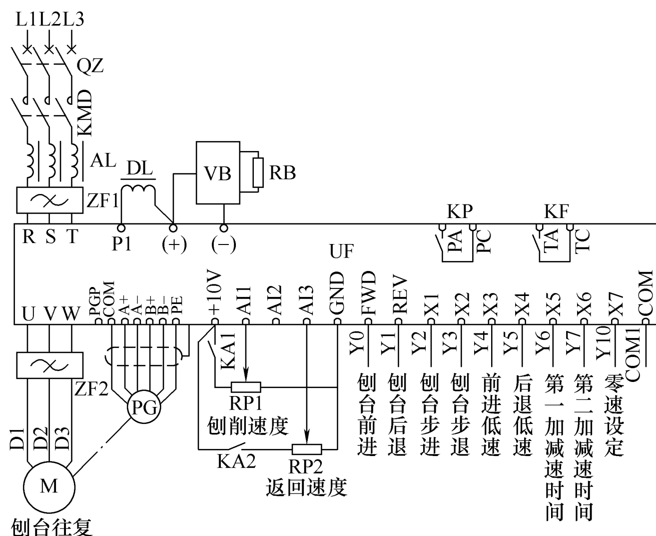


图 7-39　变频调速控制电路

（3）刨削低速和返回低速　这两种低速一般是不需要调节的，故分别由多挡速度中的第 1 和第 2 挡速度来决定。如必须改变时，可通过重新预置第 1 和第 2 挡速度来解决。

问题 55　怎样选择龙门刨床变频器直流回路中的制动电阻？

如上述，刨台在工作过程中，处于频繁地往复运行状态。为了提高工作效率、缩短辅助时间，刨台的升、降速时间应尽量地短。因此，变频器直流回路中的制动电阻与制动单元是必不可少的。

制动电阻的电阻值：根据实际试验，制动转矩应不小于电动机额定转矩的 1.5 倍。现刨台拖动电动机的功率是 55kW，额定电流为 106A，则制动电阻计算如下：

$$R_{\mathrm{B}}=\frac{2U_{DH}}{K_BI_{MN}}=\frac{2\times700}{1.5\times105}\Omega=8.9\Omega$$

实际购得 380V、5kW 的电热管，则每根电热管的电阻值是

$$R_{01}=\frac{U^2}{P}=\frac{380^2}{5000}\Omega=29\Omega$$

两根串联为一组，则每组的电阻值是

$$R_1=2R_{01}=2\times29\Omega=58\Omega$$

应并联组数设为 n 组，则

$$\frac{R_1}{n}\approx8.9\Omega$$

$$n=\frac{R_1}{8.9}=\frac{58}{8.9}=6.5$$

取 $n=6$ 组，即 12 根。

12 根电热管的总功率：

$$P_{\mathrm{B1}}=12\times5\mathrm{kW}=60\mathrm{kW}$$

制动电阻所需功率：

$$P_{\mathrm{B0}}=\frac{U_{DH}^2}{R_B}=\frac{700^2}{8.9}\mathrm{W}=55\ \mathrm{kW}<P_{\mathrm{B1}}$$

所以，上述电热管组的功率是足够的。

问题 56　变频器跳闸时怎样防止龙门刨床刨台滑出？

变频器跳闸后，逆变管已被封锁，变频器失去了控制电动机的能力。而刨台的惯性很大，如果在变频器跳闸时，刨台正处于高速运行状态，则断电后将继续滑行，并且很容易滑出导轨。

解决的办法是，在变频器跳闸后，迅速从外部向电动机注入直流电流，进行外部直流制动，如图 7-40 所示。图中，晶闸管 VTH 是用来接通直流电路的。就是说，当变频器跳闸时，使晶闸管因得到触发信号而导通，从而把直流电流通入电动机。

此电路也可用于当车间或全厂停电时，使刨台迅速停住。

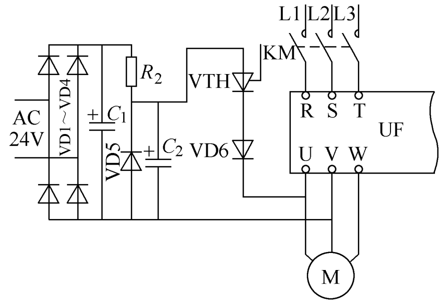


图 7-40　外部直流制动电路

问题 57　怎样改造龙门刨床中的抬刀电磁铁电路?

抬刀电磁铁原来由励磁发电机供电，电压是 230V，如图 7-41a 所示。如采用二次电压为 220V 的变压器经全波整流后供电，平均电压只有 198V，电压不足，如图 7-41b 所示。

解决的办法是增加两个升压电容器 C'，如图 7-41c 那样。升压电容器的电容量，只要比滤波电容器 C 的电容量略小一点就可以了。

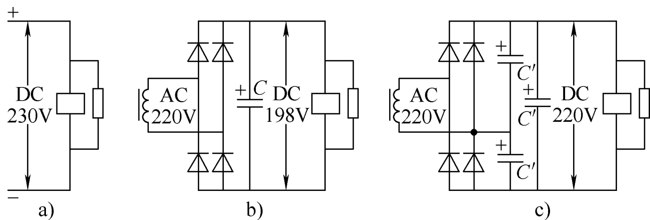


图 7-41　抬刀用整流电路

a）原来电路　b）全波整流电路　c）升压电路

7.8　印染机械的变频调速

问题 58　印染机械的工作特点如何?

有一台热溶印染机，全机分 6 个单元，分别是轧车、烘箱 1、烘箱 2、烘箱 3、烘箱 4 和落布单元，各单元分别由一台电动机拖动，如图 7-42 所示。轧车是主令单元，即全系统的速度快慢由轧车决定。其余是从动单元，从动单元的转速随主令单元一起变化。

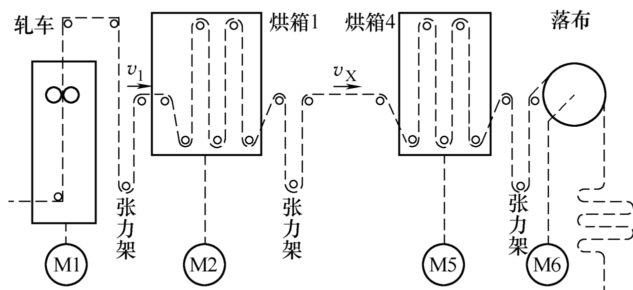


图 7-42　热溶印染机

运行时要求各单元的布速必须一致：

$$v_1 = v_2 = v_3 = \cdots\cdots$$

原来的拖动系统是由 6 台直流电动机组成的同步控制系统，有关的数据如下：

（1）各单元电动机参数

主令单元（M1）：15kW，30.3A，1460r/min；

从动单元（M2 ~ M6）：3.7 kW，8.8A，1440r/min。

（2）各单元的布速和电动机转速（见表 7-2）。

表 7-2　各单元的布速和电动机转速的对应关系

布速/（m/min）	10			30			80		
单元号	1	2 ~ 5	6	1	2 ~ 5	6	1	2 ~ 5	6
电动机转速/(r/min)	240	220	260	720	660	780	1920	1760	2080

表中：

常用的工作速度是 30 ~ 60 m/min；

最低速（10 m/min）用于开机时的导布和试车，导布时负载较重；

最高速（80 m/min）用于整匹布染完时的快速收布，负载较轻。

第 6 单元用于落布，负载稍轻。

问题 59　要实现 6 单元同步，须注意哪些问题？

主要有：

（1）各单元的转速必须能够统一调整（简称统调），即一起加

速、一直减速。

（2）从表 7-2 中可以看出，各单元的传动比是不相同的。此外，2 ~ 6 单元的电动机功率虽然相同，但它们的负载轻重是不一样的，它们的机械特性也不可能完全一致。因此，即使是一起加速、一直减速，但各单元的布速仍会有差异。所以，各单元电动机的转速都必须能够单独进行微调。

问题 60　怎样知道布速是否同步？

在印染机械上，通常用张力架来取出同步信号，如图 7-43a 所示。当 $v_1 > v_2$ 时，张力架必下降；当 $v_1 < v_2$ 时，张力架必上升，当 $v_1 = v_2$ 时，张力架位置不变。张力架和一个可变电阻 RP1 的滑动端相连，现在，可变电阻 RP1 通常采用无触点电位器。电位器的两端接到电源的‘+’端和‘–’端。所以，电位器滑动端的电位是可‘+’可‘–’的，如图 7-43b 所示。

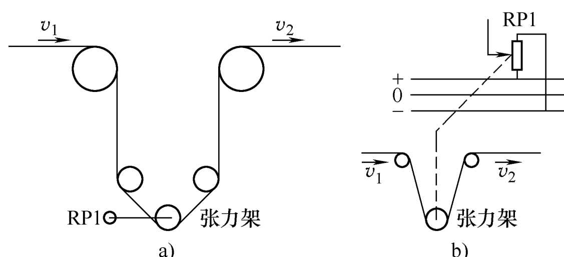


图 7-43　同步信号的取出

a）张力架　b）信号的取出

问题 61　“明电”变频器的给定系统有什么特点？

因为日本明电 VT230S 系列的变频器开发了一些针对纺织机械的功能，使用起来比较方便，故选用该系列变频器。它有一个专用的辅助信号输入端 AUX，各参数之间的关系如图 7-44 所示，各端子输入信号之间的关系是：

$$Y = AX + B + C \tag{7-18}$$

式中　Y——综合给定信号；

X——频率给定信号；

A——频率增益；

B——偏置频率；

C——辅助给定，从 AUX 端子输入。

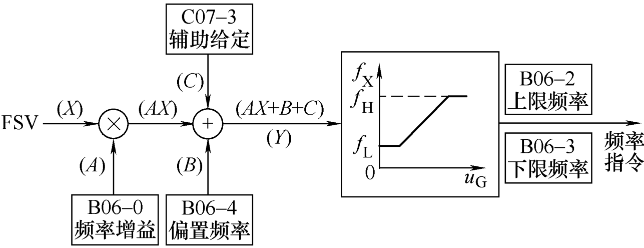


图 7-44　明电变频器的频率给定

问题 62　怎样预置各单元的偏置与增益?

因为打算采用无反馈矢量控制方式，电动机的机械特性很‘硬’，实际转速与同步转速十分接近，故各单元的转速所对应的频率可以按实际转速计算出来。以主令单元在布速为 80m 时的最高转速为例，对应的频率计算如下：

$$f_{H1}=\frac{pn_{01}}{60}=\frac{2\times1920}{60}\text{Hz}=64\text{Hz}$$

式中　f_{H1}——和 1 单元最高转速对应的工作频率，Hz；

p——电动机的极对数；

n_{01}——1 单元的最高转速（见表 7-2），r/min。

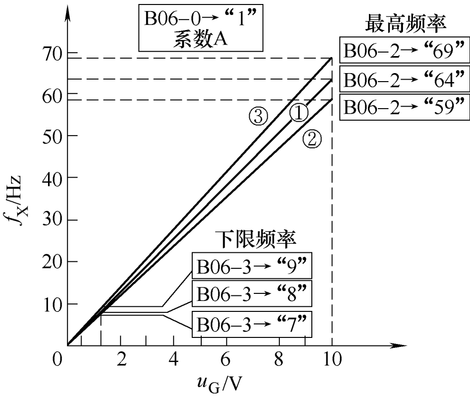


图 7-45　频率给定线的预置

同样可算出：2～5 单元为$f_{H2}=59Hz$；6 单元为$f_{H3}=69Hz$。

而与步速等于 10m 时的最低转速对应的频率为

$$f_L=\frac{pn_0}{60}=\frac{2\times240}{60}Hz=8Hz$$

同样：2～5 单元为$f_{L2}=7Hz$；6 单元为$f_{L3}=9Hz$。

关于频率给定线的预置方法是：将图 7-43 中的系数 A 都预置为'1'，各单元的最高频率分别预置为 64Hz、59Hz 和 69Hz。因此，不同单元的频率给定线也不一样，如图 7-45 所示，曲线①是主令单元的频率给定线，曲线②是 2～5 单元的频率给定线，曲线③是 6 单元的频率给定线。

7.9　二次方律负载的变频调速

问题 63　什么是二次方律负载？主要特点是什么？

二次方律负载是指阻转矩与转速的二次方成比例的负载，其典型实例是离心式风机和水泵，如图 7-46a 所示。

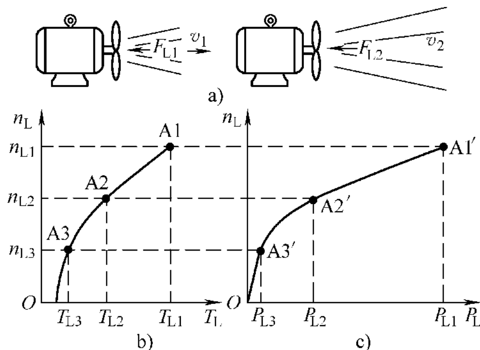


图 7-46　二次方律负载及其特性

a）风扇叶片　b）机械特性　c）功率特性

这类负载大多以使流体（气体或液体）获得一定的流量为目的。由于流体本身无一定形状，且在一定程度上具有可压缩性（尤其是气体），故难以直观地分析其阻转矩的形成，本书将只引用有关的结论。

1. 转矩特点　负载的阻转矩 T_L 的基本部分与转速 n_L 的二次方成正比

$$T_L = T_0 + K_T n_L^2 \tag{7-19}$$

式中　T_0——空载转矩，主要是摩擦转矩等（N · m）；

K_T——转矩常数。

其机械特性曲线如图 7-46b 所示。

在忽略空载转矩的情况下，负载转矩与转速的二次方成正比

$$T_L \approx K_T n_L^2 \tag{7-20}$$

2. 功率特点　将式（7-20）代入机械功率的计算式，得

$$P_L = \frac{T_0 n_L}{9550} + \frac{K_T n_L^2 n_L}{9550} = P_0 + K_P n_L^3 \tag{7-21}$$

式中　P_0——空载功率（kW）；

K_P——功率常数。

假设频率调节比 k_F 为

$$k_F = \frac{f_X}{f_N} \tag{7-22}$$

则式（7-21）可写为

$$P_L = k_F P_{0N} + k_F^3 P_{MN} \tag{7-23}$$

式中　P_{0N}——工频运行时的空载功率。

在忽略空载功率的情况下，负载的功率 P_L 与转速 n_L 的三次方成正比：

$$P_L \approx K_P n_L^3 \approx k_F^3 P_{MN} \tag{7-24}$$

问题 64　二次方律负载在实现变频调速时，工作频率能否超过额定频率？

二次方律负载是不允许在额定转速以上运行的。举例说明如下：

假设电动机的工作频率上升至 55Hz，即转速增加 10%：

$$n_X = 1.1 n_{MN}$$

则：

（1）从负载侧看　由式（7-20），负载转矩将增加为

$$T_{LX} = (1.1)^2 T_{LN} = 1.21\ T_{LN}$$

可见，负载转矩将增加 21%。

（2）从电动机侧看　由电动机的有效转矩线可知，在额定频率

以上运行时，电动机的有效转矩将下降为

$$T_{MX}=\frac{T_{MN}}{1.1}=0.9T_{MN}$$

因此，电动机实际超载率为

$$\frac{1.21}{0.9}-1=0.34$$

即实际超载达34%，所以是不允许的。

问题65　二次方律负载在实现变频调速时，怎样预置加、减速时间？

二次方律负载主要是风机和水泵，这两种负载一般不需要频繁起动和制动。因此，并不需要对加、减速时间进行限制。但两者的惯性大小却截然不同，大致如下：

1. 风机类负载　多数惯性较大，故加、减速时间应预置得长一些。

2. 泵类负载　一般说来，泵类负载的惯性都不大。但另一方面，加、减速时间如预置得太短，将可能导致管路的水锤效应。所以，从避免水锤效应的角度出发，加、减速时间也应该预置得长一些。

问题66　75kW的风机采用变频调速后，最大工作频率约在45Hz以下，能否采用55kW的变频器？

由式（7-24），在损失功率忽略不计的情况下，风机的功率与转速的三次方成正比：

$$\frac{P_{LX}}{P_{LN}}=\left(\frac{n_{LX}}{n_{LN}}\right)^3=k_f^3 \tag{7-25}$$

当$f_X=45$Hz时，有：

$$k_f=\frac{45}{50}=0.9$$

$$P_{LX}=0.9^3P_{LN}=0.9^3\times75=54.7\text{kW}$$

如果把忽略了的损失功率计入，则P_{LX}将大于55kW。

但还有另一个方面，风机在选择电动机容量时，常常留有一定的裕量。就是说，当它全速运行时，实际取用的功率P_{LN}不一定真达到

75kW。

针对以上情况，应根据以下情况进行判断：

（1）当风机工作在 45Hz 时，具体地测量电动机运行电流的大小。

（2）注意所用变频器的额定电流。同样是 55kW 的变频器，不同品牌变频器的额定电流是不一样的。几种比较典型的 55kW 变频器的额定电流见表 7-3。

表 7-3　不同品牌 55kW 变频器的额定电流

变频器型号	55kW 额定电流/A	变频器型号	55kW 额定电流/A
森兰 SB12	112	明电 VT230S	108
安邦信 AMB—G7	128	安川 CIMR—G7A	128
英威腾 INVT—G9	110	ABB—ACS550—01	124
富士 5000P11S	112	丹佛士 VLT5000	106

总之，必须根据实际电流的大小以及变频器的额定电流来确定。

问题 67　某 55kW 鼓风机实际工作时的运行频率在 45Hz 以下，需要大风量时，切换至工频运行，能否选用 45kW 的变频器？

这个问题与上面的问题完全相同，但因提供的具体数据较多，故可计算如下：

1. 基本数据　电动机数据：$P_{MN}=55\text{kW}$、$n_{MN}=980\text{r/min}$、$I_{MN}=104.9\text{A}$。

工频运行时实测电流 $I_M=98\text{A}$。

鼓风机效率 $\eta_F=0.88$

2. 具体计算

（1）工频运行时的数据

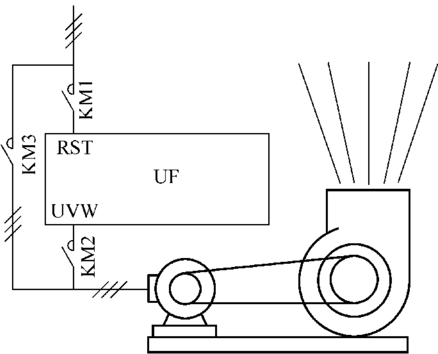


图 7-47　鼓风机的控制方式

负载率　$\sigma_{M}=\frac{98}{104.9}=0.93$

损失功率　$P_{0}=55\times(1-0.88)=6.6\text{kW}$

（2）45Hz 时的运行功率　45Hz 时的频率调节比

$$k_{F}=\frac{45}{50}=0.9$$

由式（7-24）：

$P_{MX}=k_{F}P_{0}+k_{F}^{3}\ (P_{MN}\sigma_{M})$

$\quad=0.9\times6.6+0.9^{3}\times55\times0.93=43.2\text{kW}$

3. 结论　可以选用 45kW 的变频器，但最好在变频器的输出端接入输出电抗器。

7.10　风机的变频调速

问题 68　110kW 风机采用变频调速后由人工控制其风量，主要预置哪些功能？

1. 频率给定方式　预置的主要依据大致如下：

（1）操作者与变频器的距离；

（2）调速的频繁程度。

一般说来，如果操作者离变频器较近，或者虽然距离较远，但调速并不频繁者，应尽量采用键盘控制的方式。

如果操作者离变频器较远，调速又比较频繁者，应采用外接控制方式（远控方式）。在外接控制方式中，建议尽量采用升速/降速功能，如图 7-48 所示。

2. 最高频率或上限频率　因为风机是二次方律负载，如问题 64 所述，转速如增加 10%，负载的阻转矩将增加 21%，电动机极易过载，风机的叶片和轴承等也容易损坏。所以，二次方律负载是不允许在额定频率以上运行的，故最高频率或上限频率应预置为 50Hz。

3. 转矩补偿　应预置“负补偿线”。

4. 加、减速时间　风机的加、减速有两个特点：

（1）惯性大；

（2）起动与制动的次数少。

因此，加、减速时间可以任意延长，直至在起动与制动过程中不跳闸为止。对于 110kW 的风机，加速时间和减速时间可预置为 60 ~ 120s。

5. 变频和工频的切换　在许多场合，风机是不允许停机的。在这种情况下，一旦变频器发生故障，应能自动地切换到工频电源上去。

6. 其他功能

（1）载波频率　风机本身的噪声较大，常可掩盖变频调速后的电磁噪声。因此，载波频率可以预置得较低一些，以减小对其他设备的干扰。

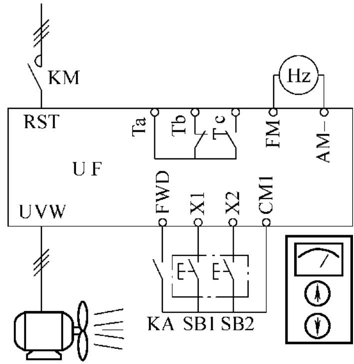


图 7-48　风机的变频调速

（2）回避频率　风机因为惯性大，故固有振荡频率较低，在调速过程中容易发生振荡。调试时应注意观察，如发现有振荡现象，应预置回避频率。

问题 69　某商场根据客流规律，要求排风扇在各时段的风量如图 7-49 所示，如何控制（开机和关机由人工进行，所购变频器是英威腾 INVT-P9 系列）？

可以利用变频器的程序控制功能进行控制。由图 7-49 知：

第一程序段：工作频率 $f_{X1}=50\times70\%=35\text{Hz}$（风量与转速成正比）；

工作时间 $t_1=(11-8)\times3600\text{s}=1080\times10\text{s}$。

第二程序段：工作频率 $f_{X2}=50\times90\%=45\text{Hz}$；

工作时间 $t_2=(18-11)\times3600\text{s}=2520\times10\text{s}$。

第三程序段：工作频率 $f_{X3}=50\times80\%=40\text{Hz}$；

工作时间 $t_3=(22-18)\times3600\text{s}=1440\times10\text{s}$。

主要功能预置见表 7-4。

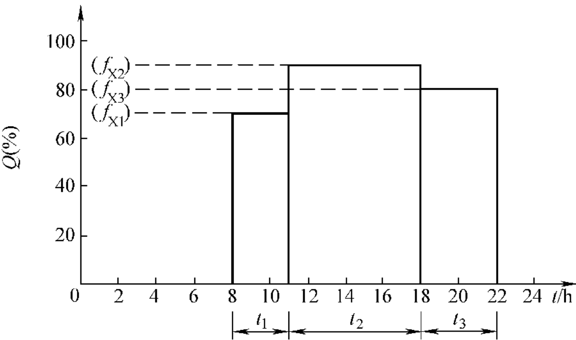


图 7-49　排风扇运行时序

表 7-4　程序控制功能预置表

功能码	功能含义	预置数据码	数据码含义	说　　明
5—00	第一段速度	35Hz	第一程序段运行频率	
5—01	第二段速度	45Hz	第二程序段运行频率	
5—02	第三段速度	40Hz	第三程序段运行频率	
5—07	程序运行模式选择	0	程序运行一周后停止	
5—08	程序运行方向	0	正转	
5—09	主频率运行时间	0		不设主频率
5—10	第一段时间	1080×10s	第一段频率的运行时间	以 10s 为单位显示
5—11	第二段时间	2520×10s	第二段频率的运行时间	
5—12	第三段时间	1440×10s	第三段频率的运行时间	

问题 70　冷却水塔的风机在水温超过 27℃时起动（运行频率不低于 25Hz），**水温超过 35℃时，运行频率必须上升至 50Hz，如何控制？**

1. 控制要求

（1）温度控制范围是 27～35℃；

（2）变频器对应的输出频率为 25～50Hz。

2. 控制要点

（1）温度信号的取出　由热敏电阻配合温度变送器取出。热敏电阻与温度变送器的量程选 $\theta_A = 0 \sim 50℃$，输出信号选 $U_S = 0 \sim 10V$，两者的对应关系如图 7-50b 所示，温度变送器的输出信号直接接至变频器的频率给定端。

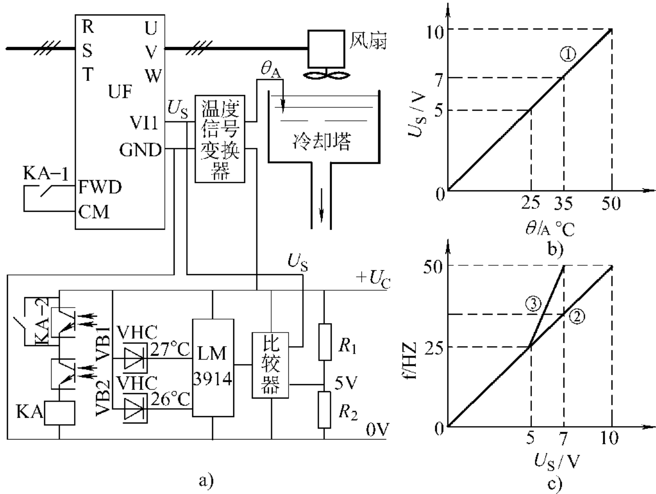


图 7-50　水塔冷却风机的控制举例

a）控制电路　b）温度变送器信号　c）频率给定线

（2）频率给定线　根据要求，当给定信号 $U_S = 5V$（对应温度为 25℃）时，变频器的输出频率为 $f_X = 25Hz$；当给定信号 $U_S = 7V$（对应温度为 35℃）时，变频器的输出频率为 $f_X = 50Hz$。故频率给定线如图 7-50c 中之曲线③所示（曲线②基本频率给定线）。

（3）回差的设置　系统在 27℃处容易发生振荡现象，即：水温

到了 27℃，风机起动，使水温下降；水温低于 27℃，风机又停止，形成反复起动和停止。为了防止反复起动和停止，应该设置一个回差，即：水温到了 27℃，风机起动，水温下降时，必须低于 26℃，风机才停止。

设置回差的方法颇多，这里介绍笔者常用的一种。将温度变送器的输出信号送入比较器，与 25℃的基准信号（5V）相比较。比较结果由“点/条显示驱动器”LM3914 分成十个挡次，对应温度为 26 ~ 35℃，如图 7-50a 所示。必要时，可以用十个发光二极管显示其温度（图中从略）。

在 26℃和 27℃处，分别接光耦合管 VB1 和 VB2 的输入侧（二极管部分），它们的输出侧和继电器 KA 的线圈互相串联。当温度上升至 26℃时，VB1 导通，但并无作用。当温度上升至 27℃时，VB2 也导通，继电器 KA 线圈得电，触点 KA-1 使变频器开始运行，其输出频率将逐渐上升至 25Hz 以上，冷却风机起动。触点 KA-2 使继电器 KA 自锁，当温度低于 27℃，但高于 26℃时，虽然光耦合管 VB2 截止，但因 KA 已经自锁，保持通电状态，故冷却风机不停机。当温度低于 26℃时，光耦合管 VB1 也截止，KA 线圈断电，冷却风机停止运行。

3. 变频器主要功能的预置　以康沃 CVF—P2 系列变频器为例，主要功能预置见表 7-5。

表 7-5　冷却塔风机变频器的功能预置

功能码	功能名称	数据码	数据含义
b—1	频率输入通道选择	2	选择外部电压信号 1（即从 VI1 端输入）
b—3	运行命令通道选择	2	外部端子（键盘 STOP 有效）
b—7	加速时间	60s	冷却风扇的叶片较大，惯性大，故加速时间和减速时间应预置得长一些
b—8	减速时间	60s	
L—0	V/F 曲线类型选择	2	递减转矩曲线 2
L—3	上限频率	50Hz	
L—4	下限频率	25Hz	
L—34	VI1 输入下限电压	5V	与 25℃相对应，如图 6-50c 所示

（续）

功能码	功能名称	数据码	数据含义
L—35	VI1 输入上限电压	7V	与 35℃相对应，如图 6-50c 所示
L—49	输入下限对应频率	25Hz	L—34、L—35、L—49 和 L—50 用于决定频率给定线（图 7-50c 中之曲线③）
L—50	输入上限对应频率	50Hz	

7.11　水泵的变频调速

问题 71　单台水泵开环控制时应预置哪些功能？

应该预置的主要功能有：

1. 频率给定方式　原则是尽量方便操作，如：

（1）变频器与操作人员距离较近者，可选择键盘控制方式；

（2）变频器与操作人员距离较远者，应选择外接端子控制方式。如：电位器控制方式，或升、降速控制方式。如 5.2 节所述，后者是较好的选择。

2. 加、减速时间　水泵的惯性很小，但为了避免水锤效应，加、减速时间不宜预置得太短。具体时间视水泵容量的大小而定，容量越大，加、减速时间应预置得越长。

3. 转矩提升　基本出发点是力争扩大节能效果。如上述，应选择具有负补偿特性的低减 U/f 线。如变频器有自动节能功能，应将它预置成“有效”。

4. 上限频率　水泵的运行频率如超过额定频率，容易造成电动机过载。如在额定频率下运行，则因为变频器本身也有损耗的原因，其输入功率将大于工频运行时所消耗的功率。故上限频率的大小应预置为

$$f_H \leqslant f_N$$

5. 下限频率　运行频率太低，水泵的扬程可能不足。故水泵下限频率的大小主要取决于静扬程。

问题 72　恒压供水要达到什么目的？

对供水系统进行的控制，归根结底，是为了满足用户对流量的需

求。考虑到在动态情况下，管道中水压的大小与供水能力（由供水流量 Q_G 表示）和用水需求（由用水流量 Q_U 表示）之间的平衡情况有关：

如：供水能力 Q_G > 用水需求 Q_U，则压力上升（$P\uparrow$）；

如：供水能力 Q_G < 用水需求 Q_U，则压力下降（$P\downarrow$）；

如：供水能力 Q_G = 用水需求 Q_U，则压力不变（P = const）。

可见，保持压力的恒定，也就保证了供水能力和用水流量之间的平衡，恰到好处地满足了用户所需的用水流量，这就是恒压供水所要达到的目的（图 7-51）。

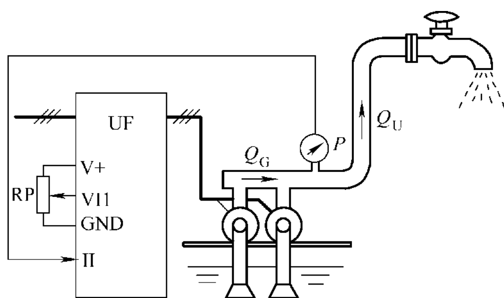


图 7-51　恒压供水的目的

问题 73　什么是睡眠与唤醒功能？

变频器的睡眠与唤醒功能实质上就是暂停运行功能。

在生活供水系统中，夜间的用水量常常是很少的，即使水泵在下限频率下运行，供水压力有可能超过一定的上限值 P_H，这时，可使主水泵暂停运行，称之为“睡眠”。当由于用水流量增加，使供水压力低于压力下限值 P_L 时，主水泵应结束暂停状态，重新开始工作（唤醒），进入正常的恒压供水运行状态。

对暂停运行的处理方式主要有两种：

1. 根据供水压力大小决定是否暂停　以康沃 CVF—P2 系列变频器为例，如图 7-52 所示，当用水流量太小而使压力超过预定的上限值（P_H）时，便开始确认，如在预置的确认时间 t_d 内压力又低于上限值 P_H 了，则不必暂停；但如果在确认时间 t_d 内，压力始终大于上

限值，则主水泵应暂停运行（睡眠）。

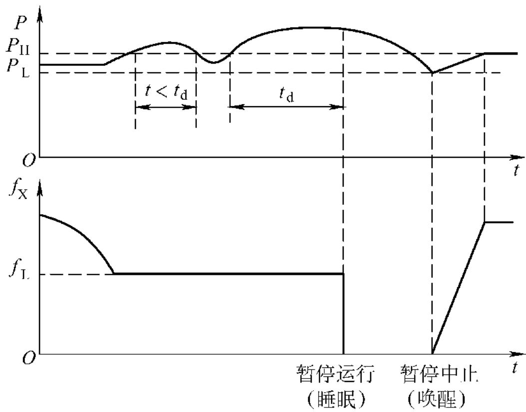


图 7-52　CVF—P2 变频器的暂停运行功能

在主水泵停机期间，为了不影响个别用户的用水，应起动辅助小泵，以保证供水。也有采用气压罐来保持一定的供水压力的。

2. 根据运行频率决定是否暂停　如 ABB 公司的 ACS800 系列变频器，如图 7-53 所示。

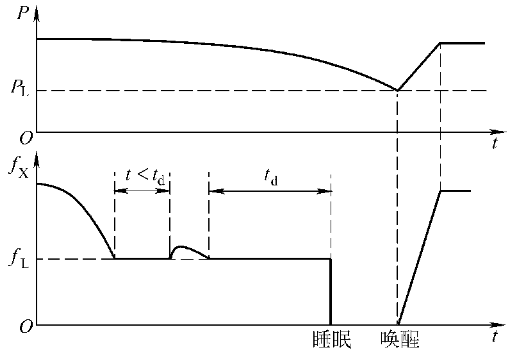


图 7-53　ACS800 变频器的暂停运行功能

当用户的用水量减小，变频器的运行频率降低至下限频率时，变频器就开始确认，如果在下限频率下的运行时间不长，则不必暂停；如果在下限频率下的运行时间超过了确认时间 t_d，则变频器认为用户

的用水流量维持在较低的水平，主水泵应该暂停运行（睡眠）。

问题 74　“一变多泵”与“每台变频”各有什么优缺点？

所谓“一变多泵”，是指多台水泵由一台变频器来进行控制。其主要优点是减少了一次性的投资费用。但就工作性能而言，“每台变频”要比“一变多泵”优越得多。

1. 节能效果显著　详见下章。

2. 控制系统简便可靠　“一变多泵”控制方式在运行过程中，有工频运行和变频运行相互切换的环节，如 5.5 节所述，工频运行和变频运行的切换控制是比较复杂的，如切换不好，将有可能导致严重的断路器跳闸事故。

在“每台变频”控制方式中，不存在工频运行和变频运行切换的问题。只需控制在什么情况下增加运行水泵，什么情况下减少运行水泵就可以了。

问题 75　有一台 10kW 消防泵，平时用于供水约只需 2.2kW，能否配用容量较小的变频器？

可以配，但须注意以下问题：

1. 必须设计切换电路　即，一旦发生火警时，应能自动切换为工频运行。

2. 变频器容量不能太小　如采用 2.2kW 变频器，因 10kW 电动机的参数与 2.2kW 电动机相差太远，逆变过程中的冲击电流，有可能超过 2.2kW 变频器的承受能力。建议选用 5.5kW 以上的变频器。

3. 载波频率的预置　为了减小逆变过程中的冲击电流，应尽量减小脉冲宽度，故变频器的载波频率应预置得大一些。

4. 加接输出电抗器　在变频器的输出侧和电动机之间，最好加接输出电抗器，以进一步减小逆变过程中的冲击电流。

问题 76　某车间供水系统共用三台水泵，两台 22kW，一台 7.5kW，小泵仅在高峰期作补充用，打算实行变频调速，如何安排？

1. 基本考虑　建议对两台 22kW 的水泵采用变频调速，进行恒压供水；7.5kW 的小泵则采取直接工频运行的方式，作补充供水之用，如图 7-54 所示。

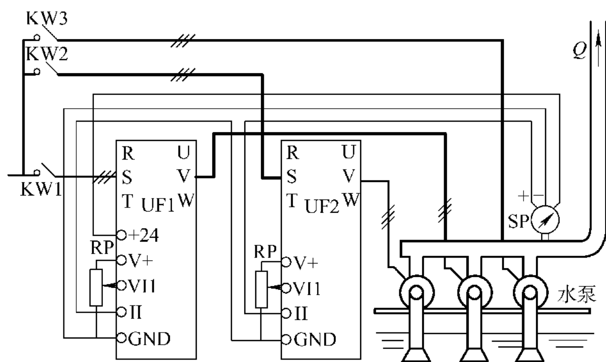


图 7-54　两变一工控制电路

由于用户不希望另行购买 PID 调节器，故采取由变频器进行 PID 调节的方式。压力变送器选用电流输出方式，将两台变频器的电流给定端串联后接至压力变送器的输出端。

2. 控制方式　用水量较小时，由 1 号变频泵进行恒压供水。当 1 号泵已经在上限频率下运行，而水压仍不足时，起动 2 号变频泵，由两台变频泵进行恒压供水。如两台变频泵在上限频率下运行，而水压仍不足时，起动 3 号泵（工频直接起动）。

3. 功能预置　为了防止因两台变频器的步调不一致而使系统运行不稳定，预置功能时应注意：

（1）两台变频器的所有参数都预置得完全相同；

（2）积分时间应尽量地预置得长一些，以防止振荡。

问题 77　怎样实现浅水池的水位控制？

（1）基本构成　浅水池的水位控制可采用电极式水位传感器，也叫杆式水位传感器。它由若干根杆式电极所构成，如图 7-55a 所示。E1 杆是公共极，E2 杆的末端与下限水位对齐，E3 杆的末端与上限水位对齐。

由于所控制的水一般都不是纯水，有一定的电导率。因此，当水位高于下限水位时，E2 杆与 E1 杆之间将处于导通状态，当水位达到上限水位时，E3 杆与 E1 杆之间也处于导通状态。

（2）信号处理器　为了安全起见，检测电路的电压应采用直流低压（通常≤24V），而水的电阻又较大，故信号电流很小，如直接

用来作为控制信号，可靠性较差。通常要用一个信号处理器来进行处理。信号处理器的作用有二：

1）放大　把电极所得的信号放大后转换成可靠的开关信号（如继电器触点的通、断信号）。

2）进行逻辑变换　如把上限水位的到达信号（相当于常开信号）变换成常闭信号，或把下限水位的缺水信号（相当于常闭信号）变换成常开信号等。

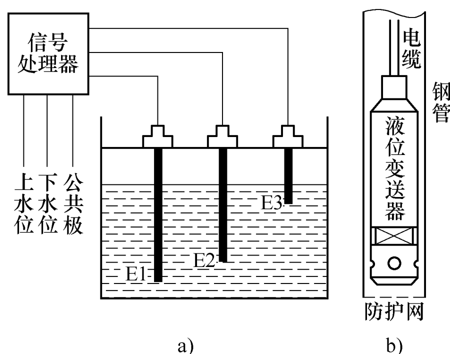


图 7-55　液位传感器

a）杆式变送器　b）液位变送器

杆式水位传感器的一个明显的缺点，是测试深度受到限制。此外，由于每根杆的长度通常为1m，因此，测试深度难以任意取值。

问题78　怎样实现深水池的水位控制？

深水池的水位控制宜采用液位变送器，即直接把液面的位置变换成电流或电压信号的装置。过去，由于液位变送器的价格较昂贵，影响了它的普及应用。最近，我国生产的DS□□□□—QS系列液位变送器，其性能价格比有了较明显的提高，颇受用户欢迎。今介绍如下：

1. 外形及安装特点　外形如图7-55b所示。安装时，只需将液位变送器放入一钢管中，钢管的底端装一防护网，以防止较大的颗粒状杂物侵入。钢管的上端露出液面。

变送器可以输出与液位成正比的电压信号或电流信号。购买时应说明被测水池的深度，以便使输出信号与所要求的水位量程相对应。

DS□□□□—QS系列液位变送器最大可以测量0～100m的深度，这是杆式传感器所难以做到的。

2. 信号处理　信号处理的方法很多，目的是把输入信号（如为

电流信号，通常先转换成电压信号）和若干个与所要求的水位对应的标准信号相比较，得到各水位的开关信号。

这里介绍一种利用 LM3914 点/条显示集成电路进行转换的电路，如图 7-56a 所示。

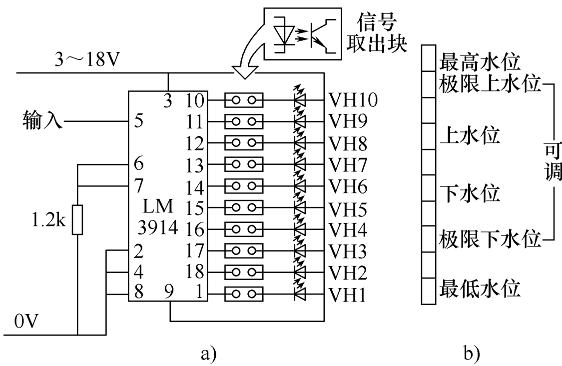


图 7-56　水位变送器的转换电路

a）转换电路　b）显示

LM3914 有十个输出端，可对应于十个液位。其输出信号可以用若干个由光耦合管构成的“信号取出块”任意选接。未被选中者只需将相关端子短接即可。

在十个液位处还可以接入十个发光二极管，以便进行液位显示，如图 7-56b 所示。

LM3914 还可以将 n 个心片“串接”起来，将被测液位细分为 $n\times10$ 个液位。因此，其测试深度可以任意取值。

3. 水位控制的变频调速系统

（1）利用多挡速功能进行控制　将水池水位分成四挡：下极限水位、下限水位、上限水位、上极限水位。经信号处理器处理后，其对应点 K_{LL}（与下极限水位对应）接至变频器的 X1 端（即 X1 与 CM 之间，下同）；K_L（与下限水位对应）接至变频器的 X2 端；K_H（与上限水位对应）接至变频器的 X3 端；K_{HH}（与上极限水位对应）变换成常闭触点后接至变频器的 FWD 端，如图 7-57 所示。

在预置变频器各挡转速的工作频率时，其速度挡次如下：当水位在下极限水位与下限水位之间时，为第 1 挡转速（X3、X2、X1 的状态为 001），因水位偏低，工作频率应预置为最高频率，通常为 50Hz；当水位在下限水位与上限水位之间时，为第 3 挡转速；（X3、X2、X1 的状态为 011），这时的水位属于正常水位，为了节能起见，工作频率可略低，如 40Hz；当水位在上限水位与上极限水位之间时，为第 7 挡转速；（X3、X2、X1 的状态为 111），因水位偏高，工作频率应再低一些，如 30 ~ 35 Hz；当水位超过上极限水位水位时，K_{HH}的常闭触点使 FWD 和 CM 之间断开，变频器暂停输出，水泵暂停供水。

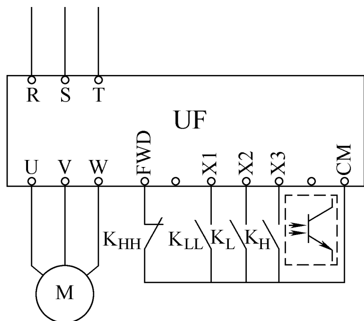


图 7-57　多挡速控制的接法

（2）利用升、降速功能进行控制　利用升、降速功能进行水位控制的电路如图 7-58 所示。这里，与下限水位对应的触点 K_L 为常闭触点，接在变频器的 X4 与 CM 之间。当水位低于下限水位时，X4 与 CM 之间闭合，频率上升，水泵加速，增大供水流量；直至水位高于下限水位时，触点 K_L 断开，频率停止上升，保持当前流量。

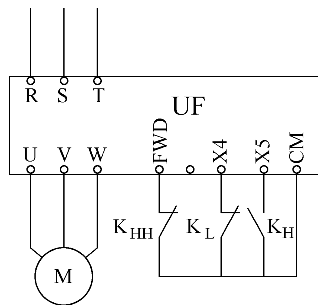


图 7-58　升、降速控制端

当水位高于上限水位时，触点 K_H 闭合，变频器的 X5—CM 接通，频率下降，水泵减速，减小供水流量；当水位低于上限水位时，触点 K_H 断开，频率停止下降，保持当前流量。

如果由于用水量的急剧下降而使水位高于上极限水位时，则触点 K_{HH}断开，变频器停止工作，水泵暂停供水。

这里，与下极限水位对应的触点 K_{LL}并不起调频的作用，但可用来进行报警。

7.12　变频调速取代其他调速电动机

问题 79　橡胶机械采用直流电动机可以起动，改造为变频调速时难以起动，为什么？

1. 实例　有一台橡胶机械，采用直流电动机调速，因故障率较高，需要改造成变频调速。

直流电动机的铭牌数据是：75kW、1500r/min、220V、383A。

电动机的额定转矩是：

$$T_{MND}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times 75}{1500}=477.5\text{N}\cdot\text{m}$$

改造成变频调速时，所选三相异步电动机的铭牌数据是：75kW、1480r/min、139.7A。

电动机的额定转矩是：

$$T_{MNA}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times 75}{1480}=484\text{N}\cdot\text{m}>T_{MND}$$

橡胶机械需要较大的起动转矩，故采用了“有反馈矢量控制”方式。但是，在满载起动时，却怎么也起动不起来。

2. 直流电动机的起动转矩　一般说来，直流电动机的起动转矩可达额定转矩的（2.5～3）倍左右。

本案例中，直流电动机的起动转矩为

$$T_{MSD}=(2.5\sim 3)T_{MND}=(2.5\sim 3)\times 477.5$$
$$=(1193.75\sim 1432.5)\text{N}\cdot\text{m}$$

式中　T_{MSD}——直流电动机的起动转矩（N·m）。

2. 异步电动机的起动转矩　工频运行时，异步电动机的起动转矩只有额定转矩的 1.5 倍左右：

$$T_{MSA}=1.5T_{MN}$$

式中　T_{MSA}——工频运行时的起动转矩（N·m）

采用变频调速，并采用矢量控制方式时，其最大的起动转矩也只有额定转矩的（1.8～2）倍。结合本例，则：

$$T_{MSA4}=2.0T_{MN}=2.0\times 484=968\ \text{N}\cdot\text{m}<T_{MSD}$$

式中　T_{MSA4}——4 极电动机矢量控制时的起动转矩（N·m）。

很明显，4 极异步电动机的起动转矩比直流电动机小多了，所以

难以起动。

问题 80　上述问题，能解决吗？

改用 6 极异步电动机，则电动机的额定转速为 980 r/min，额定转矩为

$$T_{MN6}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times 75}{980}=730.8\ \mathrm{N\cdot m}$$

式中　T_{MN6}——6 极异步电动机的额定转矩（N·m）。

起动转矩为

$$T_{MS6}=2.0T_{MN}=2.0\times 730.8=1461.6\ \mathrm{N\cdot m}>T_{MSD}$$

式中　T_{MS6}——6 极电动机矢量控制时的起动转矩（N·m）。

可见，6 极异步电动机的起动转矩比直流电动机还要大许多。

采用了 6 极异步电动机后，起动问题是解决了，但是，在直流电动机的额定转速处，6 极异步电动机的工作频率将超过额定频率：

$$f_H=f_{MN}\frac{n_{MND}}{n_{MN6}}=50\ \frac{1500}{980}=76.5\mathrm{Hz}$$

异步电动机在工作频率超过额定频率时，其有效转矩将减小。因此，必须校验上限频率时有效转矩是否满足要求：

$$T_{ME6}=T_{MN6}\frac{f_{MN}}{f_H}=730.8\times\frac{50}{76.5}=477.6\ \mathrm{N\cdot m}\approx T_{MND}$$

因此，当异步电动机的额定转速比直流电动机低一个挡次（例如，直流电动机的额定转速为 1500 r/min，而异步电动机为 980 r/min）时，两者的有效转矩线如图 7-59a 所示，图中，曲线①是过电流电动机的有效转矩线；曲线②是 6 极异步电动机矢量控制时的有效转矩线。而功率曲线则如图 7-59b 所示。图中，曲线③是直流电动机的有效功率线；曲线④是 6 极异步电动机的有效功率线。两者的比较结果如下：

（1）在 6 极异步电动机的额定转速以下，异步电动机的有效转矩比直流电动机大得多，从而，起动转矩也较大。

（2）当转速达到异步电动机的额定转速时，异步电动机轴上的有效功率已经达到额定功率，而直流电动机的有效功率则较小。

（3）异步电动机在额定转速以上，有效转矩线具有恒功率特点。

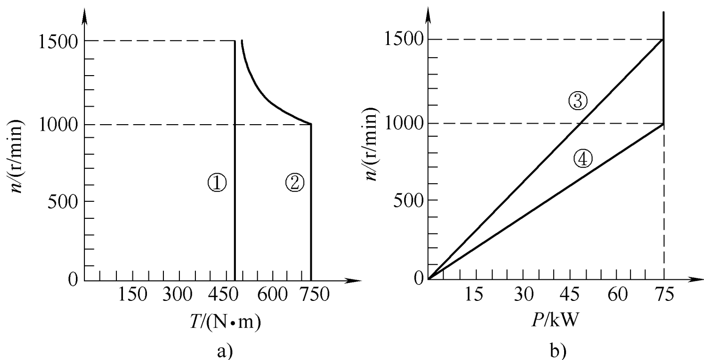


图 7-59　电动机调速的有效转矩线和功率曲线
a）有效转矩线　b）功率曲线

（4）在达到直流电动机的额定转速时，两者的有效转矩和有效功率都近乎相等。

问题 81　电磁调速电动机怎样实现变频调速?

电磁调速电动机相当于两级异步电动机，其结构原理如图 7-60 所示。拖动电动机 M 是第一级异步电动机，它带动一对固定磁极旋转，产生机械的旋转磁场，也就是第二级异步电动机的磁场。第二级的转子因切割机械旋转磁场而产生感应电动势和电流，并且产生电磁转矩，使转子旋转。旋转磁极的励磁电流由转速调节器 SR 提供。调节电位器 RP，可以调节 SR 的输出电压和电流，从而调节了机械旋转磁场的磁通，在负载转矩不变的情况下，转差必增大，最终是调节了转子的转速。

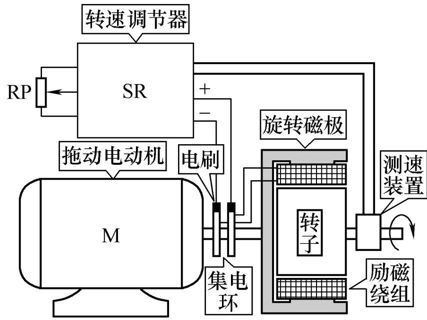


图 7-60　电磁调速电动机的结构

在进行变频改造时，一般有三种方案：

第一种方案，是把励磁电流保持在最大位置，然后对拖动电动机实施变频调速，如图 7-61a 所示。此方案的有效转矩较小，且因为没

有反馈环节，机械特性很软，实践证明，此法并不实用。

第二种方案，是把两个旋转部分固定成一体，如图 7-61b 所示，以减小功率损耗。此方案的机械特性取决于变频器，故可用。

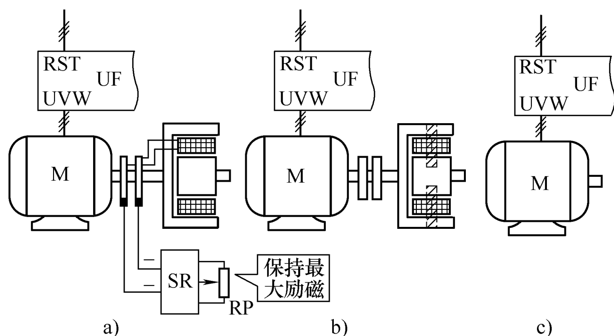


图 7-61　电磁调速电动机的变频改造方案

a）最大励磁电流　b）第二级固定　c）另选电动机

第三种方案，另找一台和拖动电动机同容量的电动机来实现变频调速，如图 7-61c 所示。此方案存在的问题是：

因为原来的电磁调速电动机的额定转速较低，如 1200r/min，改造为变频调速后，额定频率时的转速较高，如 1460r/min，当转速等于电磁调速电动机的额定转速时，电动机的实际工作频率较低，为 41Hz，电动机的有效功率只有额定功率的 82%。因此，其带负载能力和上述的两个方案十分接近。如果能够适当加大传动比，使负载运行在最高转速时，电动机的工作频率等于额定频率，则带负载能力可增大 21%。

问题 82　有一台机器，原来采用的是电磁调速电动机，最低速时能带动，改造为变频调速后，最低速时带不动，什么原因？怎么解决？

1. 实例　某拖动系统的数据是：

拖动电动机：15kW、1460r/min、30. 3A。

拖动电动机额定转矩：96 N · m。

输出轴转速范围：1200 ~ 200 r/min。

额定转矩：T_{MN} = 94N · m。

负载转矩：T_L ≈ 105 N · m（测试结果）。

带负载时电动机转速范围：800 ~ 200 r/min。

由于电磁调速电动机在一次事故中损坏了，而相同规格的电磁调速电动机已经不生产，故要求改造成变频调速。

改造时，采用上述第三种方案，但在最低速时带不动负载。

2. 原因分析　电磁调速电动机是通过调节励磁电流来调节转速的。在没有转速负反馈时的机械特性很软，图 7-62 中之曲线① ~ ⑥所示，是在不同励磁电流时的机械特性曲线簇，这样的特性，是很难带动负载稳定运行的。

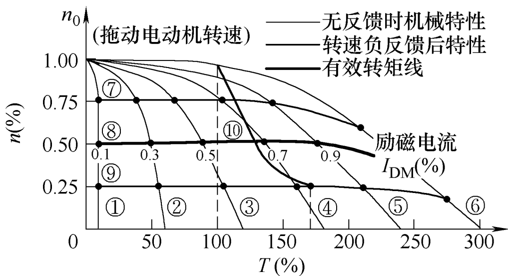


图 7-62　电磁调速电动机的机械特性

但在加入了转速负反馈以后，当负载增加，转速降低时，转速负反馈的结果，是增大励磁电流，从而可以使机械特性变得较硬，如图中之曲线⑦ ~ ⑨所示。

由图还可以看出，加入了转速负反馈后，在额定励磁电流下，低速时的电磁转矩反而比高速时大。就是说，它在低速时的有效转矩，是可以大于额定转矩的。据有的产品介绍，在最低速时的有效转矩可达额定转矩的 1.7 倍。

而变频调速在调频过程中，其有效转矩是不可能超过额定转矩的。所以，电磁调速电动机低速时能带动的负载，变频调速却带不动。

根据用户提供的数据，负载的机械特性如图 7-63 中之曲线①所示。而拖动电动机变频调速后的有效转矩线如曲线②所示。显然，变

频调速时将带不动负载。

3. 解决办法　由于负载的上限转速较低，故可以采用 6 极电动机，电动机的主要数据是：15kW、970r/min、31.5A。

其额定转矩计算如下：

$$T_{MN}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times 15}{970}\text{N}\cdot\text{m}=148\ \text{N}\cdot\text{m}$$

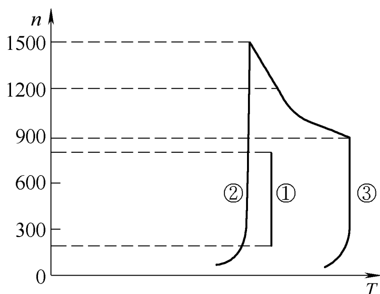


图 7-63　电磁调速电动机的改造方案

变频后的有效转矩线如曲线③所示，完全可以满足要求。

问题 83　变频调速取代三相换向器电动机时，应注意哪些问题？

1. 实例　有一台排粉机，原来采用三相整流子电动机，其铭牌数据及运行数据如下：

额定功率：160kW；额定电流：285A；

实际工作电流：234A；负载率：$\xi_A\approx 0.82$；

额定转速：1050/350r/min；传动比：$\lambda=2$。

现改造为异步电动机变频调速。电动机的铭牌数据是：160kW、275A、1480 r/min。配上变频器后的运行结果是：当转速为 1050r/min 时，电动机明显过载，电流达 316A。

2. 原因分析

（1）原拖动系统的计算数据

原电动机的额定转矩：

$$T_{MNO}=\frac{9550P_{MNO}}{n_{MNO}}=\frac{9550\times 160}{1050}=1455\text{N}\cdot\text{m}$$

式中　T_{MNO}——原电动机的额定转矩，N · m；

P_{MNO}——原电动机的额定功率，kW；

n_{MNO}——原电动机的额定转速，r/min。

负载的折算转矩：

$$T_L' = T_{MN0}\xi_A = 1455 \times 0.82 = 1194 \text{ N} \cdot \text{m}$$

式中　T_L'——负载的折算转矩，N · m；

ξ_A——原电动机的负荷率。

负载的实际转矩：

$$T_L = T_L'\lambda = 1194 \times 2 = 2388 \text{ N} \cdot \text{m}$$

式中　T_L——负载的实际转矩，N · m；

λ——传动比。

负载的最高速：

$$n_{Lmax} = \frac{n_{MOmax}}{\lambda} = \frac{1050}{2} = 525 \text{ r/min}$$

式中　n_{Lmax}——负载的最高转速，r/min；

n_{MOmax}——原电动机的最高转速，r/min。

负载的最大功率：

$$P_{Lmax} = \frac{T_L n_{Lmax}}{9550} = \frac{2388 \times 525}{9550} = 131 \text{ kW}$$

式中　P_{Lmax}——负载的最大功率，kW。

（2）改为变频调速后的计算数据

最高转速时的工作频率：

$$f_{XH} = \frac{pn_{Omax}}{60} = \frac{2 \times 1050}{60} = 35\text{Hz}$$

式中　f_{XH}——和原电动机最高转速对弈的工作频率，Hz；

n_{Omax}——原电动机的最高转速，r/min。

异步电动机在 $f_X = 35\text{Hz}$ 时的有效功率：

$$P_{ME} = P_{MN}\frac{f_X}{f_N} = 160 \times \frac{35}{50} = 112 \text{ kW} < P_{Lmax}$$

式中　P_{ME}——异步电动机的有效功率，kW；

P_{MN}——异步电动机的额定功率，kW；

f_X——异步电动机的运行频率，Hz；

f_N——异步电动机的额定频率，Hz。

电动机的额定转矩：

$$T_{MN} = \frac{9550P_{MN}}{n_{MN}} = \frac{9550 \times 160}{1480} = 1032\text{N} \cdot \text{m} < T_L' \ (= 1194 \text{ N} \cdot \text{m})$$

式中　T_{MN}——异步电动机的额定转矩，N · m。

显然，变频调速时，电动机将处于过载状态，过载率为：

$$\beta=\frac{T_L'}{T_{MN}}=\frac{1194}{1032}=1.15$$

式中　β——计算过载率。

与实际的过载情况完全吻合：

$$\beta_M=\frac{I_M}{I_{MN}}=\frac{316}{275}=1.15$$

式中　β_M——实际过载率。

2. 解决办法

改用 6 极电动机，铭牌数据是：160kW，297A，980 r/min

额定转矩：

$$T_{MN(6)}=\frac{9550P_{MN}}{n_{MN}}=\frac{9550\times160}{980}=1559\text{N}\cdot\text{m}$$

式中　$T_{MN(6)}$——6 极电动机的额定转矩，N · m。

在 1050r/min 时的工作频率：

$$f_{X(6)}=f_N\frac{n_{MX}}{n_{MN}}=50\times\frac{1050}{980}=53.6\text{Hz}$$

式中　$f_{X(6)}$——6 极电动机在最高速时的运行频率，Hz。

在 1050r/min 时的电动机有效转矩：

$$T_{MX(6)}=T_{MN}\frac{f_N}{f_X}=1559\times\frac{50}{53.6}=1454\ \text{N}\cdot\text{m}>T_L'\ (=1194\ \text{N}\cdot\text{m})$$

式中　$T_{MX(6)}$——6 极电动机在最高速时的有效转矩，N · m。

7.13　特殊电动机的变频调速

问题 84　电磁制动电动机怎样接线?

电磁制动电动机的电路内部已经接好，如图 7-64a 所示。

因为电磁铁的线圈 MB 是一个大电感，当电源电压为正半周时，电源通过 VD1 向线圈 MB 提供电流，当电源电压为负半周时，电源不再提供电流，而是由线圈的自感电动势使电流通过 VD2 继续流动，

VD2 称为续流二极管。RV 是压敏电阻，是防止在续流二极管电路一旦发生接触不良等故障时，用于保护线圈的。

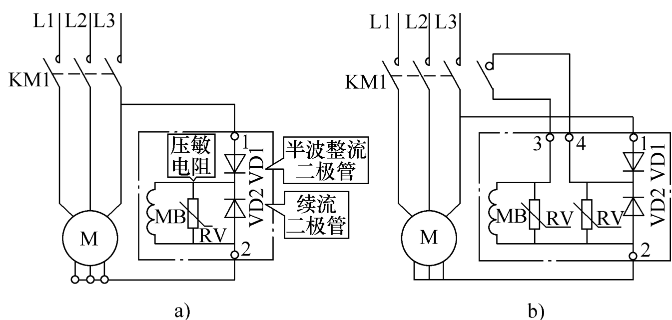


图 7-64　电磁制动电动机

a）一般接法　b）快速制动接法

因为切断电源后，线圈也还要续流，会延长制动器抱紧的时间。所以，对于一些要求准确定位的场合，就希望能够消除这一段续流时间。具体方法如图 b 所示，停机时，切断续流电路。

问题 85　电磁制动电动机实现变频调速有什么好处?

工频运行时，制动器的摩擦片的损坏率很高，因为在额定转速下，制动器不论是从抱紧到松开，或由松开到抱紧的过程中，摩擦片之间都会有一个‘打滑’的过程。尤其是在高速状态下停机时，完全靠摩擦片来强行制动，所以，摩擦片很容易磨损。

采用变频调速后，可以利用直流制动功能，使制动器的得电松开和失电抱紧的过程都在直流制动的状态下进行。摩擦片的寿命可以大幅度延长。

问题 86　电磁制动电动机怎样实现变频调速?

首先，制动器在出厂时和电动机共电源的连接线不能再用，必须通过单独的接触器与电源相接，如图 7-65a 所示。

因为电动机的正、反转要和制动器的接触器 KM2 相配合，故正、反转控制由继电器 KF 和 KR 来执行。输出端子 Y1 预置为频率检测，检测的水平可预置得低一点，例如预置为 6Hz 或更低，用于在停机过程中控制 KM2 的失电。

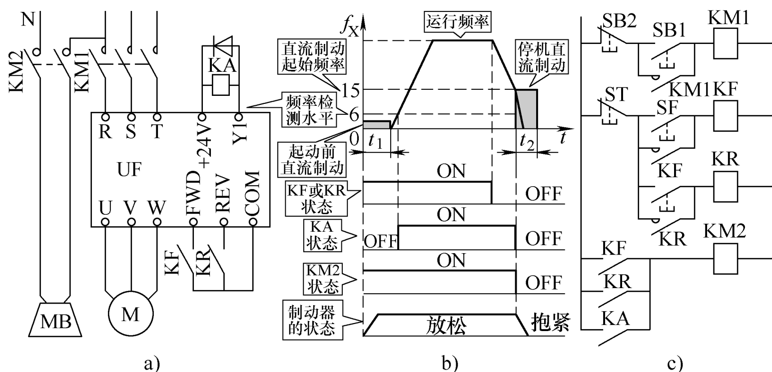


图 7-65　电磁制动电动机的变频调速

a）控制电路　b）动作时序　c）控制电路

以正转起动为例，当继电器 KF 得电时，令接触器 KM2 也得电，制动器开始放松；变频器在得到起动指令后，首先执行起动前的直流制动。因制动器的松开时间一般在 0.6s 以内，故起动前直流制动的时间可预置为 1s。这样，制动器的松开过程是在电动机尚未旋转的过程中进行的，不存在摩擦片的磨损问题。当变频器的输出频率上升到 6Hz 以上时，继电器 KA 得电，KA 的动合触点将使 KM2 保持通电。

停机时，KF 断开，因为 KA 仍处于得电状态，故 KM2 并不失电。这时，变频器的输出频率按预置的减速时间下降，当下降到直流制动的起始频率（图中设为 15 Hz）时，开始直流制动，变频器的输出频率降为 0Hz，继电器 KA 失电，使接触器 KM2 也失电，制动器开始抱紧。因为电动机已经直流制动了，制动器在抱紧过程中，电动机已经停住，也就不存在摩擦片的磨损了。

问题 87　直流制动能否代替电磁制动器？

这要根据生产机械的具体情况来判断。核心的问题是：生产机械停住后，有没有外力（例如起重机械的重力等）使电动机旋转？具体地说，如果生产机械在停住后，不存在使它移动或旋转的外力的话，直流制动是能够取代电磁制动器的。反之，如果生产机械在停住后，存在着使它移动或旋转的外力的话，则电磁制动器是必须的，否

则就无法保证机器处于停住状态了。

问题 88　齿轮电动机怎样实现变频调速?

主要有以下几个问题:

1. 关于上、下限频率　齿轮电动机在低速运行时，润滑油的润滑效果变差。因此，下限频率要受到限制。一般说来，如果使用的是润滑油，则下限频率不宜低于 5Hz。如果使用的是润滑脂，则可以在更低频率下运行。

齿轮电动机在高速运行时，会增加齿轮间的磨损，故上限频率也不宜太高，一般以不超过 70 Hz 为宜，如图 7-66a 所示。

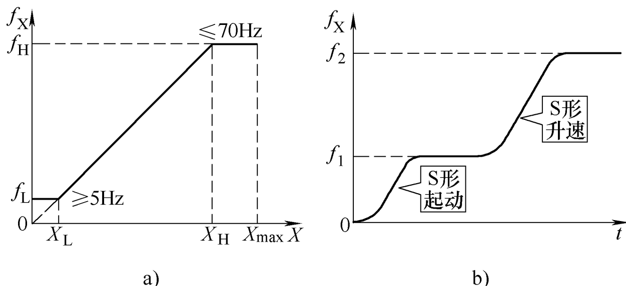


图 7-66　齿轮电动机变频调速要点

a）上下限频率　b）S 形升速

2. 关于加速方式　由于齿轮传动属于刚性连接，在加速过程中容易发生振动，如用于运输机械，则在加速过程中容易使装载物散落。因此，应采用 S 形加速方式。有的变频器从低频运行（f_1）升速到高频运行（f_2）时，也可以采用 S 形加速方式，如图 b 所示。

3. 关于低频脉动　由于采用 SPWM 调制方式，所以在低频运行时，电动机的输出转矩会有轻微的脉动，增大齿轮的噪声。因此，对于需要在较低频运行的齿轮电动机，如果齿轮的噪声较大，可在变频器与电动机之间串入电感器，如将输出线在高频磁心上绕 1、2 圈，等。

4. 关于减缓齿轮的撞击　齿轮在停机时，因为主动轮先停，故啮合点在图 7-67a 中的 B 点。起动时，主动轮将撞击从动轮的 A 点。

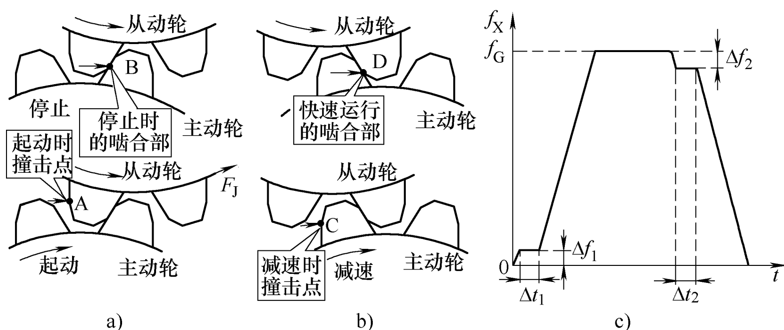


图7-67　齿轮的撞击及其减缓

a）起动时的撞击　b）减速时的撞击　c）可预置功能

在较高频率运行时，减速过程中，啮合点在图b中的D点。减速时，从动轮由于惯性，将撞击主动轮的C点。

为了减缓这种撞击，在起动时，应在很低频率 Δf_1 时停留短时间 Δt_1，使主动轮缓慢地靠上A点。而在减速时，先让工作频率下降一个微小的增量 Δf_2，并停留短时间 Δt_2，使从动轮缓慢地靠上C点，从而减缓了齿轮间的撞击，如图c所示。

问题89　潜水泵怎样实现变频调速?

潜水泵是用来潜入水池的底部向上抽水的，在实施变频调速时，需要注意的问题主要有两个：

1. 变频器的选择

（1）容量　水池的底部常常会有一些杂物堵住潜水泵底部防护网的网孔，从而加重水泵的负担，使电动机短时间过载。所以，变频器的容量应该加大一档。

（2）型号　潜水泵对机械特性的硬度并无要求，不需要矢量控制。在大多数情况下，也并不需要长时间、不间断地工作，故只需选择国产的通用变频器即可。

2. 变频器的输出线　潜水泵的电动机是和水泵做成一体与导线一起潜入水中的，导线的长度较长。从而，导线间的分布电容较大。所以，在变频器的输出端，最好接入输出电抗器，或者，把变频器与潜水泵之间的连接线在高频磁心上绕几圈，如图7-68所示。

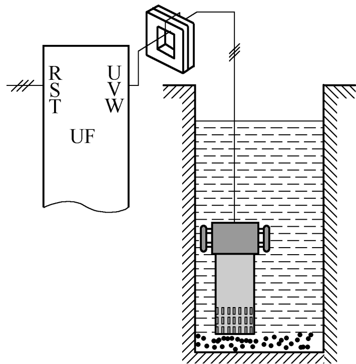


图 7-68　潜水泵变频

问题 90　同步电动机怎样实现变频调速？

同步电动机的转子是极性固定的磁极，如图 7-69a 所示。大容量电动机的转子上有通入直流电流的励磁绕组，小容量电动机的转子则多用永久磁铁。由于转子的 S 极与定子旋转磁场的 N 极牢牢吸住，转子就跟着旋转磁场一起旋转起来，两者的转速完全一致，所以叫同步电动机。

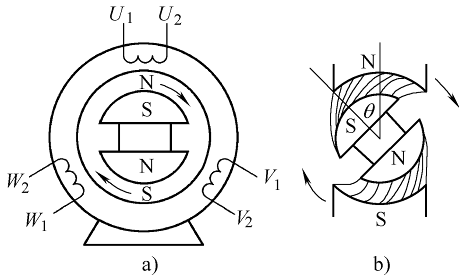


图 7-69　同步电动机的特点
a）旋转原理　b）功率角

当转子带上负载后，转子磁极的轴线只是和定子旋转磁场的轴线之间产生了一个夹角 θ，但仍被定子磁场牢牢地拉住，而不会减慢转速，如图 b 所示。这里，θ 角是一个十分重要的数据，称为功率角。

同步电动机电磁转矩的大小，在一定范围内和 θ 角成正比。

当 $\theta=\dfrac{\pi}{2}$时，电磁转矩最大。实际运行时，$\theta<\dfrac{\pi}{2}$，以留有余地。

一旦由于负载的突然增加，使电动机带不动负载，转子的转速慢了下来，同步电动机将“失步”，转子就会停下来。

同步电动机变频后，具有特别‘硬’的机械特性，如图 7-70b 所示。故可以用在需要同步运行和精密控制的场合，还可以用在伺服系统内。

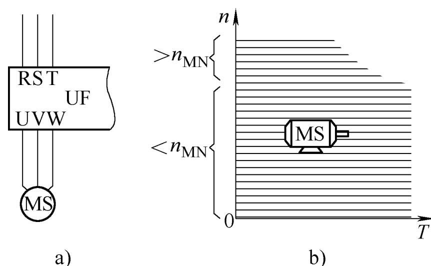


图 7-70　同步电动机变频调速效果

a）同步电动机变频　b）机械特性

同步电动机在实现变频调速时，有两种方法：一种是自控式变频调速，需要用专用的变频器，对同步电动机实现矢量控制，这里就不讨论了。另一种是他控式变频调速，就是采用普通的变频器。这时，需要注意的问题有：

1. 控制方式　只能用 V/F 控制方式。

2. 加速时间与方式　为了使同步电动机在起动过程中不失步，加速时间应预置得长一些，并采用 S 形加速方式。

第 8 章　变频调速的经济效益

8.1　节能的几个方面

问题 1　空气压缩机实现变频调速后是怎样节能的?

空气压缩机在工频运行时，如果用户的用气量不大，而空气压缩机却仍在不断地产生压缩空气，则储气罐内的压力将不断升高，造成危险。为了使储气罐内的压力保持平稳，常常用泄载阀释放掉多余的压缩空气，如图 8-1a 所示。很明显，这释放掉的空气，实际上就是一种浪费。

采用了变频调速后，可以利用变频器的 PID 调节功能，使空气压缩机产生的压缩空气和用户的用气量始终保持平衡状态。就是说，用户使用多少压缩空气，空气压缩机就产生多少压缩空气，绝无浪费。

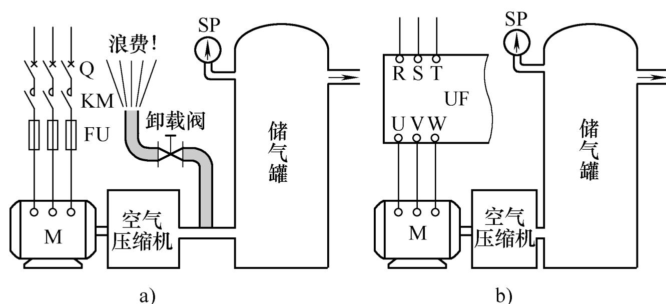


图 8-1　空压机的节能
a）工频运行　b）变频运行

问题 2　锅炉给水系统实现变频调速后是怎样节能的?

锅炉的给水泵在工频全速运行的情况下，由于给水泵的供水流量和出水流量难以平衡，锅炉内的水位常常超过极限水位，可能造成事故。为此，当锅炉汽包内的水位超过极限水位时，通过回流调节阀将水泵打出去的水部分地回流到贮水罐中，如图 8-2a 所示。显然，这回流的水，也是一种浪费。

改造成变频调速后，可以实现恒水位控制，使水位保持恒定，不必再回流了，节能效果是十分明显的。

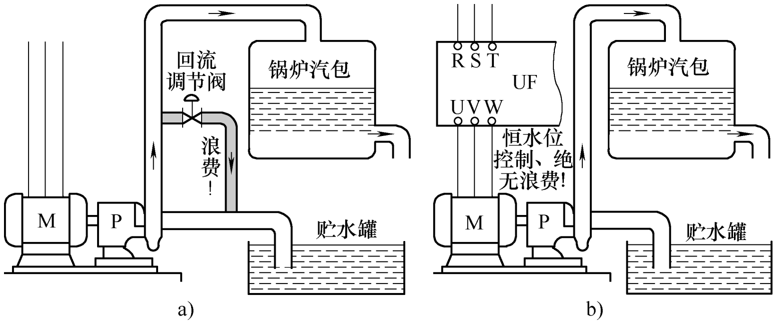


图 8-2　锅炉给水系统的节能

a）工频运行　b）变频运行

问题 3　商场的电动扶梯实现变频调速后是怎样节能的?

商场的电动扶梯在没有乘客时，据实测，电动机的空载电流约为额定电流的 50%。如改造成为变频调速，在没有乘客的情况下，可把工作频率下降到 10Hz 以下，则变频器输入侧的电流只有额定电流的 10% 左右。

据某商场统计，在非节假日，电动扶梯的空载率约为 55%。由此可见，改造为变频调速后，节能效果也是相当显著的。

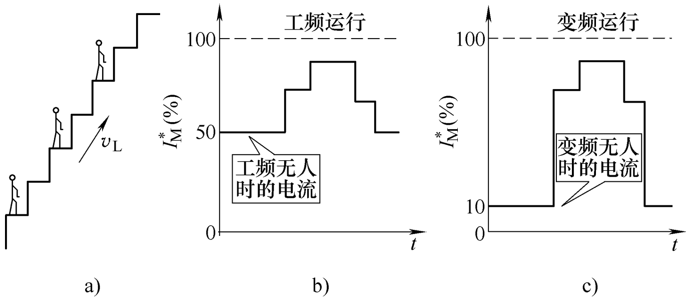


图 8-3　电动扶梯的节能

a）电动扶梯　b）工频运行工况　c）变频运行工况

问题 4　为什么降低电力拖动系统的平均转速可以节能?

首先看一下工频运行的几个例子：

（1）鼓风机通过调节风门挡板来调节风量，实际上被风门挡板消耗掉许多能量；

（2）水泵的管路通过调节阀门的开度来调节流量，实际上被阀门消耗掉大量能量；

（3）卷绕机械用磁粉离合器来保持输出转矩恒定，实际上是把多余的能量消耗在磁粉的摩擦上。

这些如能根据需要调整转速，使设备的平均转速降下来，就可以消除不必要的损耗，实现节能。

图 8-4 所示是两种典型的负载，图 8-4a 是恒转矩负载，如果能够把平均运行转速降到额定转速的 60% 的话，与工频的全速运行相比，可以节能 40%。图 8-4b 是风机水泵类负载，被称为二次方律负载，当平均转速降到额定转速的 70% 时，与工频的全速运行相比，可以节能 66%。

所以，降低电力拖动系统的平均转速，实际上是把工频运行时多消耗的能量节省了下来。

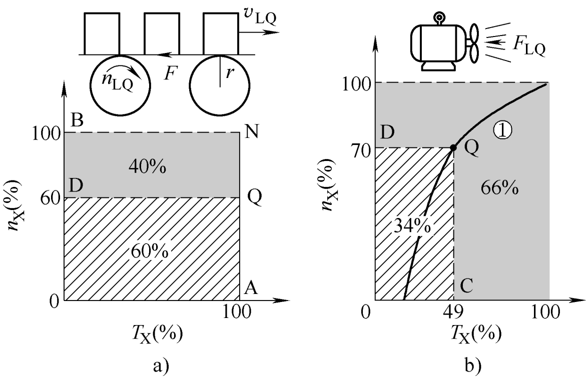


图 8-4　降低平均转速的节能

a）恒转矩负载　b）二次方律负载

问题 5　“大马拉小车”降压节能的实质是什么？

“大马拉小车”的意思，是指电动机的功率比负载实际需要的功率大了许多，电动机总是处于轻载运行状态。

根据异步电动机的等效电路，可以得到磁通、电压和负载电流之

间的关系：

$$\dot{\Phi}_1 = K_\Phi \frac{\dot{E}_{1X}}{f_X} = \frac{|\dot{U}_{1X} - \dot{I}_1 r_1|}{f_X}$$

式中　$\dot{\Phi}_1$——电动机的主磁通（Wb）；

K_Φ——比例常数；

$\dot{E}_{1X}$——反电动势（V）；

f_X——电动机的工作频率（Hz）；

$\dot{U}_{1X}$——电源相电压（V）；

$\dot{I}_1$——定子电流（A）；

r_1——定子绕组的电阻（Ω）。

负载很轻时，因为电阻压降很小，磁通将增大，电动机的磁路进入饱和区，励磁电流较大，如图 8-5a 所示。又因为功率因数较低，定子电流可能因此而变大，如图 8-5b 所示。电流大而输出功率小，说明电动机的效率较低。

如通过适当降低电压以减小磁通，则励磁电流减小，功率因数提高，定子电流减小，如图 8-5c 和 d 所示，从而减小了定子电流，提高了电动机的效率。

所以，遇到大马拉小车的情况时，可以通过降低电压来节能。而降压节能的实质，是提高电动机的效率。就是说，在输出相同功率的情况下，减少输入功率。

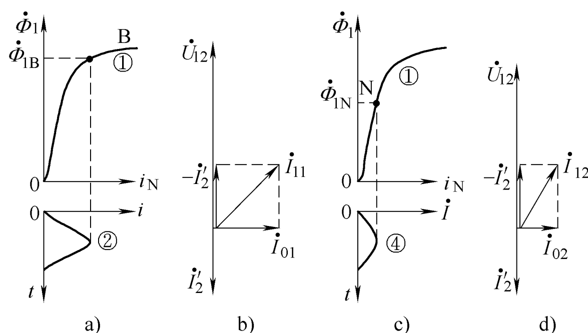


图 8-5　大马拉小车的矢量图

a）进入饱和区　b）功率因数低　c）退出饱和区　d）功率因数高

问题 6　实现变频调速是否一定能节能？

不是的。变频调速是用来调节电动机的转速的，而负载所需要的机械功率，是和转速有关的。因此，实现变频调速后，是否具有节能效果，归根结底，是和负载转速密不可分的。主要有以下几个方面：

1. 负载的平均转速　首先是负载是否需要调速？图 8-6a 所示是恒转矩负载的情况，当转速为额定转速的 70% 时，负载所需功率也只有额定功率的 70%；图 8-6b 所示是二次方律负载的情况，当转速为额定转速的 70% 时，负载所需功率只有额定功率的 41%。可见，如果负载在运行过程中的平均转速低于额定转速的话，就存在着节能的空间。反之，如果负载并不需要调速，始终以 50Hz 运行，负载本身所需的功率并不减少。那么，根据能量守恒的原则，节能是无从谈起的。

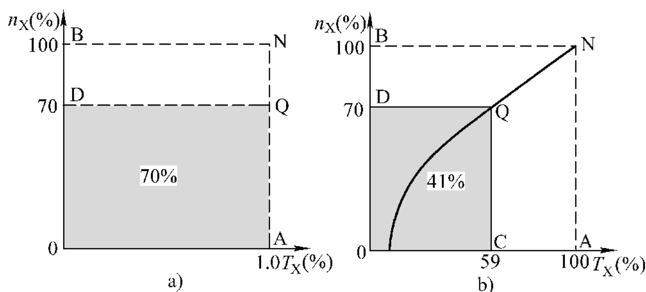


图 8-6　降速可以节能

a）恒转矩负载　b）二次方律负载

2. 负载的机械特性　如果是恒功率负载，负载功率的大小与转速无关，则即使在运行过程中是需要调速的，也并没有节能的空间。

3. 调速的方法　详细分析如下述。

问题 7　异步电动机各部分功率与机械特性有什么联系？

如图 8-7 所示，假设电力拖动系统的工作点为 Q_1：电动机转矩为 $T_{M1}(=T_{L1})$，转速为 n_1。这时：

1. 电动机的输出功率　在传动机构的损耗忽略不计的情况下，电动机的输出功率就等于负载功率：

$$P_{L1}=\frac{T_{M1}n_1}{9550} \tag{8-1}$$

式中　P_{L1}——负载功率，也是电动机轴上的输出功率（kW）；

T_{M1}——负载的转矩（N·m），$T_M = T_L$；

n_1——电动机转子的转速，也是电力拖动系统的实际转速（r/min）。

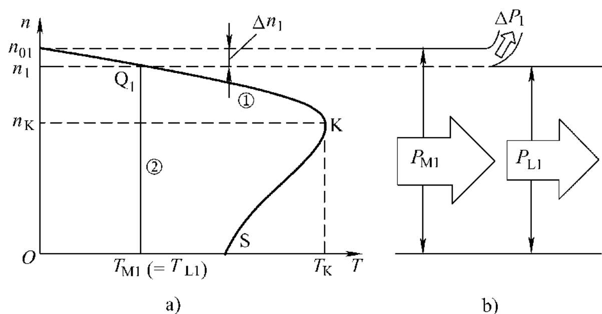


图 8-7 机械特性与能量图

a）机械特性 b）能量图

2. 电磁功率 如果转子内没有任何损耗的话，那么转子所得到的电磁功率将全部转换到电动机的输出轴上，则转子的转速应能与同步转速相一致。因此，电磁功率也可以由下式算出：

$$P_{M1} = \frac{T_{M1} n_0}{9550} \tag{8-2}$$

式中 P_{M1}——电磁功率，也是电动机转子得到的全部功率（kW）；

n_0——电动机的同步转速（r/min）。

3. 转差功率 上述两部分功率之差，称为转差功率，其大小等于转子侧的损耗功率：

$$\Delta P_1 = P_{M1} - P_{L1} = \frac{T_{M1} \Delta n_1}{9550} \tag{8-3}$$

式中 ΔP_1——转差功率（kW）；

Δn_1——转差（r/min），$\Delta n_1 = n_0 - n_1$。

由此而得到与机械特性相对应的能量图如图 8-7b 所示。

问题 8 为什么说变频调速最节能？

这是变频调速与其他几种调速方法相比较而得出的结论。比较的情况如下：

1. 绕线转子异步电动机的调速 绕线转子异步电动机是迄今为

止在起重机械中应用得较多的一种电动机。它是通过在转子回路中串联电阻的方法来进行调速的，如图 8-8a 所示。其调速后的机械特性如图 8-8b 中的曲线③所示（曲线①是自然机械特性，曲线②是负载机械特性），转子回路串入电阻后，临界转矩不变，但临界转差增大，电力拖动系统的工作点移至 Q_2 点，在负载转矩未变的情况下，转速降为 n_2。

电力拖动系统的能量图如图 8-8c 所示。由图可知，转差功率大为增加。十分明显的是：转子回路内串入电阻后，电阻中将消耗大量的功率。事实上，这是一种通过增大转子回路中功率损耗来降低转速的方法。就是说，减小了的机械功率实际上消耗到转子回路中的电阻上了。

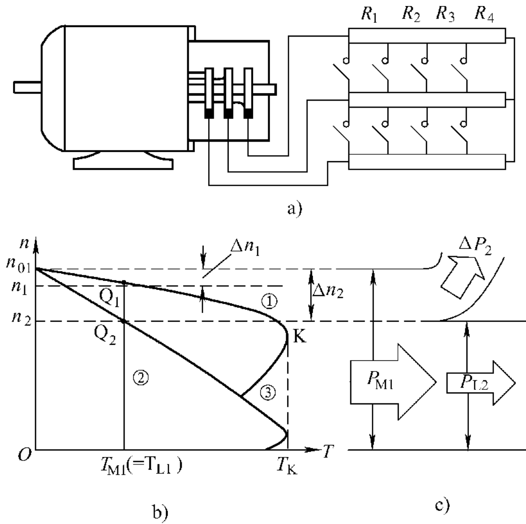


图 8-8　转子回路串联电阻的调速

a）调速方法　b）机械特性　c）能量图

2. 电磁调速电动机（滑差电动机）的调速

（1）基本原理　电磁调速电动机的基本结构如图 8-9a 所示，它相当于两级异步电动机：

第一级与普通的异步电动机无异，同步转速为 n_{01}，转子的转速为 n_{M1}；

第二级的旋转磁场由第一级的转子带动直流磁场形成，转速为 n_{M1}，第二级的转子转速即为负载所需转速 n_{M2}。

由于电磁调速电动机可以通过直流磁场调节器 AMR 和转速反馈来实现无级调速。所以，在纺织机械和塑料机械中曾经得到广泛的应用。

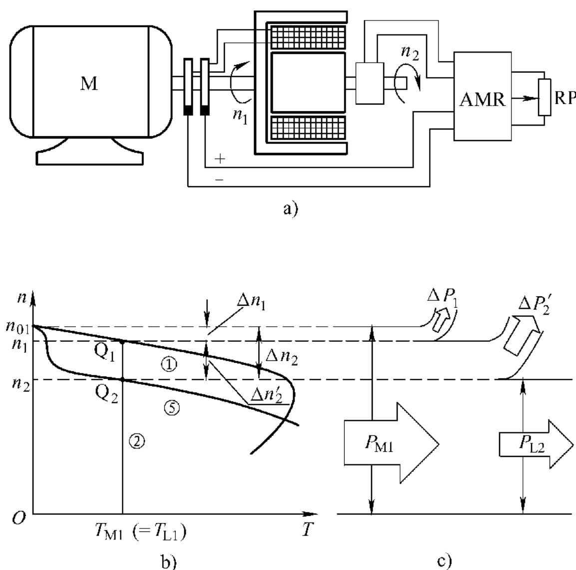


图 8-9　电磁调速电动机

a）调速方法　b）机械特性　c）能量图

（2）功耗分析　电磁调速电动机中的“第二级电动机”并不能如齿轮箱那样具有放大转矩的作用。当通过调节器 AMR 把输出转速降低（$n_{M2} < n_{M1}$）后，有：

$$P_{M2} = \frac{T_{M2} n_{M2}}{9550} < \frac{T_{M1} n_{M1}}{9550} = P_{M1}$$

显然，输出轴上减小了的功率被消耗在第二级转子里了。从本质上说，在输出功率相等的前提下，其功耗与绕线转子异步电动机时是完全相同的。

3. 变频调速　如图 8-10 所示，与上述两种调速方法相比较，它有以下特点：

由于电动机的转速是通过调节频率而改变的，在频率下降时，同步转速也同时下降。从而，转子得到的电磁功率也随着频率而下降。但转子转速与同步转速之间的转差基本不变，所以，转差功率并不增加，如图 8-10b 和 c 所示。

事实上，在变频调速时，因为变频器的输出电压必须和频率同时下降，所以，电动机的输入功率也一起下降，中间损耗能量的环节并没有多大变化。

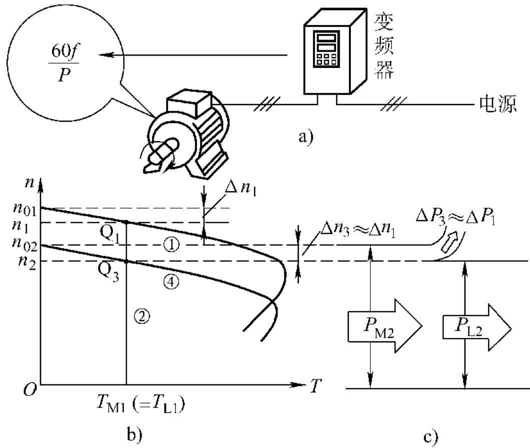


图 8-10　变频调速的能量关系

a）调速方法　b）机械特性　c）能量图

4. 与直流电动机比较

（1）电动机的效率　异步电动机的效率约为 0.85～0.9，而直流电动机的效率却只有 0.7～0.75。

（2）电动机的故障率　由于异步电动机和外电路没有电的联系，转子自成回路，故结构简单坚固，故障率极低。而直流电动机因为有电刷和换向器的原因，故障率较高。

5. 结论　不同的调速方法，其节能效果是不尽一致的。选择不当，也会造成电能的较大浪费。而在各种调速方法中，变频调速的节能效果是最好的。

问题 9　为什么二次方律负载的节能效果最好?

二次方律负载的功率特点是:

$$P_L = P_0 + K_P n_L^3 \tag{8-4}$$

在忽略空载功率的情况下，负载的功率 P_L 与转速 n_L 的三次方成正比:

$$P_L \approx K_P n_L^3$$

所以，只要平均转速稍微下降一点，负载功率就下降得很多，从而可取得可观的节能效果。

例如，平均转速为额定转速的 80% ，则负载功率为

$$P_L \approx 0.8^3 P_{LN} = 0.512 P_{LN}$$

式中　P_{LN}——在额定转速下的负载功率（kW）。

可节约功率为

$$\Delta P \approx (1 - 0.512) P_{LN} = 0.488 P_{LN}$$

可见，转速下降两成，节能达四成多。毫无疑问，这在各类负载中，其节能效果是居于首位的。

问题 10　变频器的功能预置对节能效果有影响吗?

对于二次方律负载进行变频调速时，通常都采用 V/F 控制方式。在功能预置时，一个十分突出的问题便是 *U/f* 比（转矩提升）的确定问题。

1. 出厂设定需要修改的原因　不少用户未对 *U/f* 比进行预置，用的是出厂设定，其实这是不对的。因为风机也有许多类型，它们的机械特性并不完全相同。例如，在数量上占多数的离心式风机属于二次方律负载，但罗茨风机则是恒转矩负载。变频器的出厂设定不可能兼顾各种机械的特性。就 *U/f* 比而言，通常的设定原则是大部分负载预置得当，都能够起动起来。然而，当应用于离心式风机时，*U/f* 比的出厂设定是偏大的。

2. *U/f* 比偏大的结果　当风机在低频运行时，*U/f* 比偏大相当于电压偏高，电动机的机械特性如图 8-11 所示。图中，曲线①是水泵的机械特性，曲线②是异步电动机的自然机械特性，曲线③是频率下降后的机械特性。

由图 8-11 可知，如果在额定转速时，电动机的额定转矩正好和水泵的额定转矩相等的话，在低频运行时，由于负载转矩 T_{LD}下降较

多，而电动机的有效转矩 T_{EX} 却减小有限，使拖动系统处于“大马拉小车”的状态。

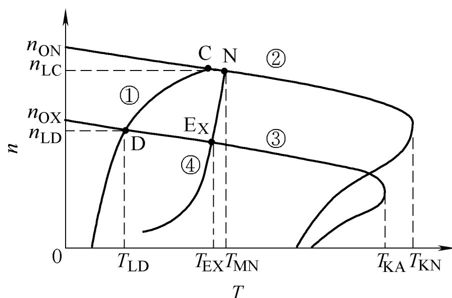


图 8-11　水泵低频运行的特点

3. 变频器的节能对策　针对上述情形，变频器“转矩提升”功能中，专门设置了电压的负补偿功能，说明书中常称为低励磁 U/f 比。

如图 8-12a 所示，曲线④′是变频器配置的低励磁 U/f 线，曲线④是压频比为常数时的 U/f 线。由图可知，当运行频率下降为 f_X 时，压频比为常数时的电压为 U_{X1}，电动机的机械特性如图 8-12b 中的曲线③所示，有效转矩点为 E_X 点，而采用低励磁压频比时的电压将下降至 U_{X2}，电动机的机械特性如图 8-12b 中的曲线③′所示，有效转矩点为 E_X'，与拖动系统的工作点 D′十分接近，“大马拉小车”的状态得到了缓解。

所以，正确地预置好变频器的功能，可使电动机进一步节能。

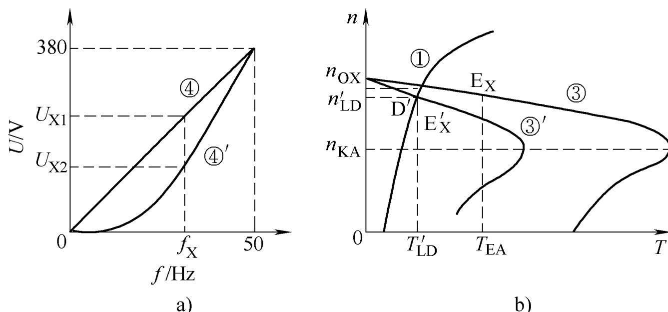


图 8-12　低励磁 U/f 比的节能原理

a）低励磁 U/f 比　b）节能原理

问题 11　变频器中的“自动节能”功能是基于什么原理设置的?

变频器中的“自动节能”功能，大致有以下两种：

1. 自动降压法　即当电动机的电流减小到一定程度时，变频器自动降低输出电压，以达到节能的效果。迄今为止，多数变频器的“自动节能”功能都属于这一种。

2. 自动搜索功能

（1）电动机运行的最佳工作点　变频器在 V/F 控制方式下运行时，由于 U/f 比可以任意预置，实际上相当于在某一频率下运行时，其输出电压是可以任意调节的。

对于电动机来说，其工作电流和电压的关系如图 8-13 所示。

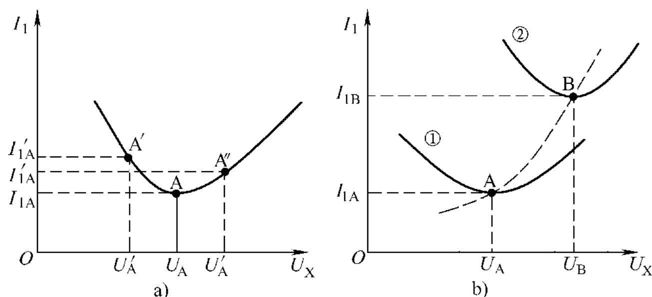


图 8-13　变频器的电流电压关系曲线

a）电流—电压曲线　b）不同负载时的最佳工作点

电压过低时，磁通减小，电磁转矩减小，转速下降，转差增大，转子电流增大，定子电流也随之增大；

电压过高时，磁通增大，电动机的磁路饱和，励磁电流增大，电流也增大。

所以，电流和电压的关系曲线呈 U 形，存在着一个最佳工作点，如图 8-13a 中的 A 点。转速变化时，最佳工作点也将转移，如图 8-13b 所示。

（2）变频器的自动搜索功能　根据上述原理，部分变频器设计了能够自动搜索最佳工作点的节能功能。其节能效果远高于一般变频器。但由于自动搜索需要时间，这就降低了变频器的动态响应能力。所以，自动搜索功能只能用于对动态响应要求不高的场合，如风机、水泵类负载中。

问题 12　因为球磨机起动困难，电动机的功率往往偏大，采用变频调速后是否可以节能？

这个问题的实质，是在额定频率下轻载运行时如何节能问题。

如上所述，异步电动机在轻载运行时，可以通过降低电压来节能。

在变频调速系统中，在额定频率下降低电压的具体方法是：适当提高基本频率。

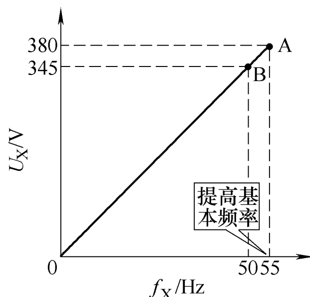


图 8-14　加大基本频率的结果

如图 8-14 所示，如果把基本频率提高为 55Hz，这意味着当变频器的输出频率为 55Hz 时，对应的输出电压是 380V，则在额定频率（50Hz）下运行时，电动机得到的电压为 345V，达到了降压节能的目的。

问题 13　上限频率偏低的变频调速系统是否有节能空间？

1. 实例与计算　某厂有一台机器，电动机的数据是：90kW、164.3A、1480r/min，计算出额定转矩等于 580N · m。实际运行电流是 150A，负载率 $\xi_1 = 0.91$，传动比 $\lambda_1 = 4$。根据工艺要求，上限频率只有 30Hz。电动机的有效功率是

$$P_{\mathrm{ME}} = P_{\mathrm{MN}} \frac{f_X}{f_N} = 90 \times \frac{30}{50} \mathrm{kW} = 54\ \mathrm{kW}$$

负载侧的数据计算如下：电动机运行在 30Hz 时的转速

$$n_{\mathrm{MX}} = n_{\mathrm{MN}} \frac{f_X}{f_N} = 1480 \times \frac{30}{50} \mathrm{r/min} = 888 \mathrm{r/min}$$

负载的转速：

$$n_{\mathrm{L}} = n_{\mathrm{MX}} / \lambda_1 = 888/4 \mathrm{r/min} = 222 \mathrm{r/min}$$

负载的转矩：

$$T_{\mathrm{L}} = T_{\mathrm{MN}} \lambda_1 \xi_1 = 540 \times 4 \times 0.91 \mathrm{N \cdot m} = 2088 \mathrm{N \cdot m}$$

负载转矩的折算值：

$$T'_{\mathrm{L1}} = \frac{T_{\mathrm{L}}}{\lambda_1} = \frac{2088}{4} \mathrm{N \cdot m} = 522 \mathrm{N \cdot m}$$

负载的功率：

$$P_L=\frac{T_L n_L}{9550}=\frac{2088\times 222}{9550}\text{kW}=48.5\text{kW}$$

如图 8-15a 所示。

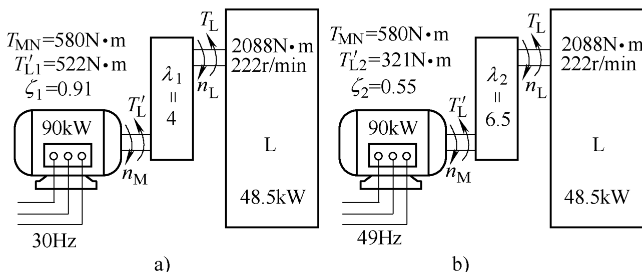


图 8-15　低频重载的节能方法

a）上限频率较低　b）提高上限频率

2. 分析　从功率看，用 90kW 的电动机拖动 48.5kW 的负载，应该属于“大马拉小车”。但是从转矩的角度看，电动机的额定转矩比负载的折算转矩大不了多少，又不属于是“大马拉小车”，这种情况，能否通过降低电压来节能?

3. 节能方法　第一步，首先要把功率的“大马拉小车”转化为转矩的“大马拉小车”。具体方法是加大传动比。

针对本例，如把传动比加大为 $\lambda_2=6.5$，那么电动机的转速就应该是 1443r/min，工作频率为 49Hz，而有效功率也就接近于额定功率了。而从转矩看，传动比加大后，负载的折算转矩减小为

$$T'_L=\frac{T_L}{\lambda}=\frac{2088}{6.5}\text{N}\cdot\text{m}=321\text{N}\cdot\text{m}$$

如图 8-15b 所示，电动机的额定转矩有 580N · m，负载率只有

$$\xi_2=\frac{T'_L}{T_{MN}}=\frac{321}{580}=0.55$$

这就把功率的“大马拉小车”转化为转矩的“大马拉小车”了。

第二步，把基本频率加大为 56Hz，则与 50Hz 对应的电压就只有 340V，从而实现了降压节能。

8.2　水泵运行的节能分析

问题 14　扬程是否就是上扬水的高度?

扬程的定义是：单位重量的水通过水泵所获得的能量，符号是 H，单位是 m。在供水系统中，扬程由两部分构成：

1. 静态扬程　就是水泵必须上扬水的高度，如图 8-16 中的 H_A 所示。也称为实际扬程。水泵的泵水能力必须超过静态扬程，才可能供水。

2. 动态扬程　水泵在供水时，非但要把水上扬到所需高度，并且还要使水具有一定的流量。在这里，使管路里的水获得一定流速所需要的能量，称为动态扬程。这部分扬程，是和高度无关的。

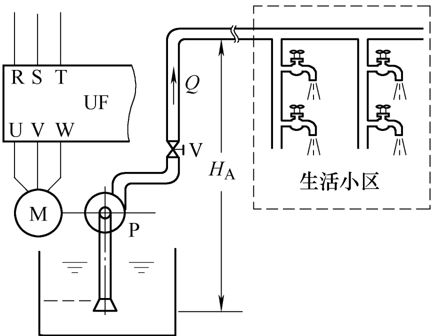


图 8-16　供水系统简图

3. 全扬程　静态扬程和动态扬程之和，称为全扬程。

问题 15　为什么要实现恒压供水?

对供水系统进行的控制，归根结底，是为了满足用户对流量的需求。所以，流量是供水系统的基本控制对象。如上所述，供水流量的大小取决于扬程，但扬程难以进行具体测量和控制。考虑到在动态情况下，管道中水压的大小与供水能力（由供水流量 Q_G 表示）和用水需求（由用水流量 Q_U 表示）之间的平衡情况有关。如图 8-17 所示，以压力传感器 SP 所在位置为分界，SP 之前的流量 Q_G 代表供水能力，SP 之后的流量 Q_U 代表用水需求，则

$$Q_G > Q_U, \rightarrow (P\uparrow);$$

$$Q_G < Q_U, \rightarrow (P\downarrow);$$

$$Q_G = Q_U, \rightarrow (P = \text{const})。$$

可见，供水能力与用水需求之间的矛盾具体地反映在流体压力的变化上。

从而，压力就成了控制流量大小的参变量。就是说，保持供水系统中某处压力的恒定，也就保证了该处的供水能力和用水流量处于平

衡状态，恰到好处地满足了用户所需的用水流量，这就是恒压供水所要达到的目的。

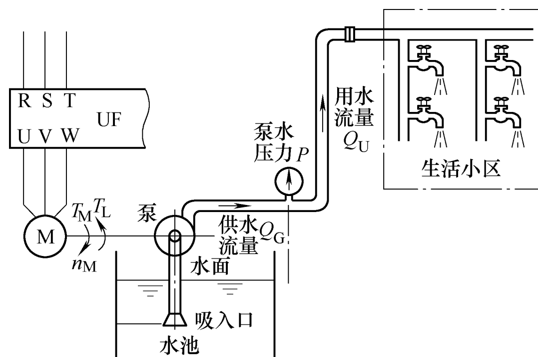


图 8-17　恒压供水目的

问题 16　节能效果主要体现在哪些部位？

1. 恒压供水的基本模型　变频调速恒压供水的基本模型如图 8-18 所示。图中，UF 是变频器，M 是电动机，P 是水泵，SP 是压力传感器。

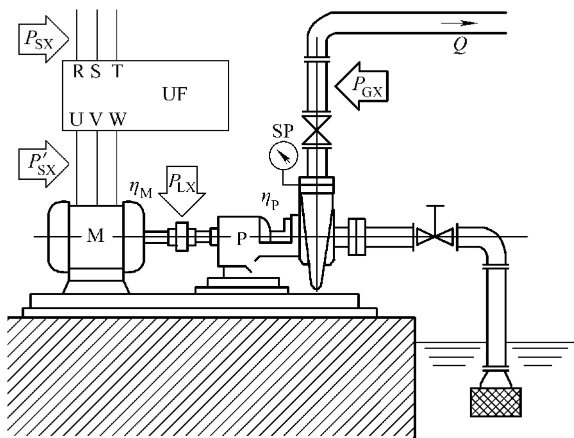


图 8-18　变频恒压供水的基本模型

2. 不同部位的功率

（1）供水功率 P_{GX}　P_{GX}是水泵向管路供水时所消耗的功率。或

者说是整个供水管路所消耗的功率。因此，其基本规律必须符合管路的各种特性（主要是扬程特性和管阻特性）。

（2）电动机轴上的输出功率 P_{LX}　P_{LX}也是水泵的输入功率。

P_{LX}和 P_{GX}间的关系取决于水泵的效率 η_{PX}：

$$\eta_{PX}=\frac{P_{GX}}{P_{LX}} \tag{8-5}$$

另一方面，由电动机来拖动水泵，属于电力拖动的范畴。因此，它也必须符合电力拖动的运行规律，即二次方律负载的相关规律。

（3）系统消耗的电功率 P_{SX}　在图 8-18 中，P_{SX}是指变频器的输入功率；P_{SX}' 是指电动机的输入功率，或变频器的输出功率。但由于变频器本身的功耗非但所占比例很小，且和工作频率关系不大，故可以粗略地认为 $P_{SX}\approx P_{SX}'$。

在进行节能分析时，归根结底，应该指整个系统耗用电能方面的节能，如图 8-18 中的 P_{SX}所示。

问题 17　怎样分析供水管路的工作状态？

1. 供水管路的特性与工作点

（1）扬程特性　以管路中的阀门开度不变为前提，表明在某一转速下，扬程 H 与流量 Q 间的关系曲线 $H=f(Q)$，称为扬程特性曲线，如图 8-19a 所示。扬程特性曲线反映了用户用水流量的大小对扬程的影响。用户的用水流量越大，则管道中的摩擦损耗也越大，供水系统的扬程将越小。

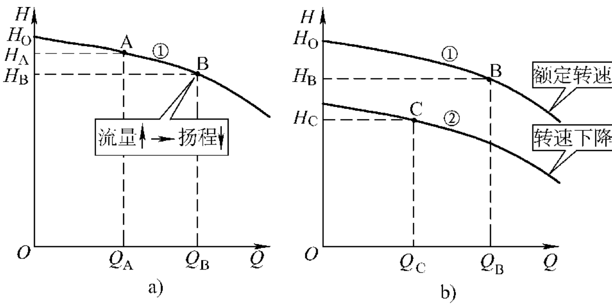


图 8-19　供水系统的扬程特性

a）全速时　b）不同转速时

水泵的转速 n 下降，其供水能力也下降，扬程特性将下移，如图 8-19b 所示。

（2）管阻特性　以水泵的转速不变为前提，表明阀门在某一开度下，扬程与流量间关系的特性曲线 $H=f(Q)$ 称为管阻特性曲线，如图 8-20a 所示。管阻特性曲线实际上是管道系统的负载特性曲线，它说明在管路内得到一定的流量所需要的扬程。管阻特性曲线与阀门的开度有关，当阀门关小时，管阻增大，在扬程相同的情况下，流量将越小，故管阻特性将上扬，如图 8-20b 所示。

管阻特性的起始扬程等于静扬程（H_A）。其物理意义是：如果扬程小于静扬程的话，将不足以克服管路的管阻，从而不能向用户供水。因此，静扬程可以认为是供水系统的"空载扬程"。

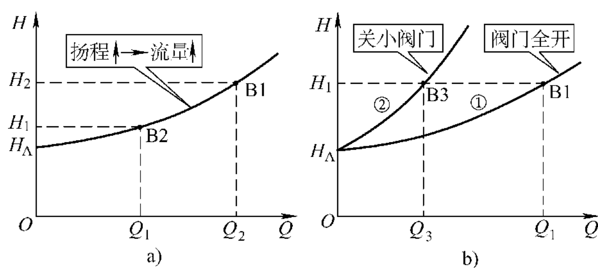


图 8-20　供水系统的管阻特性

a）阀门全开时　b）不同开度时

（3）供水系统的工作点　扬程特性曲线①和管阻特性曲线②的交点，称为供水系统的工作点，如图 8-21 中的 N 点。在这一点上，供水系统既满足了扬程特性，也符合了管阻特性。供水系统处于平衡状态，系统稳定运行。这时，流量为 Q_N，总扬程为 H_N。

2. 供水功率　供水功率与流量和扬程的乘积成正比：

$$P_G = HQ \qquad (8\text{-}6)$$

式中　P_G——供水功率（kW）。

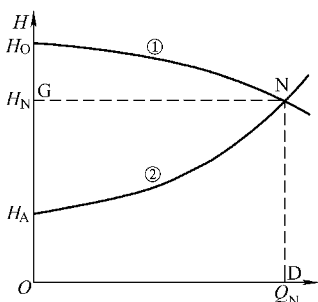


图 8-21　供水系统的工作点

如图 8-21 所示，供水功率与面

积 ODNG 成正比。

问题 18　怎样分析供水功率的节能效果？

供水功率的节能效果通常是通过对两种不同的控制流量的方法进行比较而得出的。

1. 阀门控制法　通过关小或开大阀门开度来调节流量，而转速则保持不变（通常为额定转速）。这时，管阻特性将随阀门开度的改变而改变，但扬程特性则不变。

设用户所需流量由 Q_N 减小为 Q_B，当通过关小阀门来实现时，管阻特性将改变为曲线③，而扬程特性则仍为曲线①，故供水系统的工作点移至 B 点，如图 8-22 所示。这时流量减小为 Q_B；扬程上升为 H_B；由式（8-5）知，供水功率 P_B 与面积 OEBF 成正比。

2. 转速控制法　通过改变水泵的转速来调节流量，而阀门开度则保持不变（通常为最大开度）。当水泵的转速改变时，扬程特性将随之改变，而管阻特性则不变。

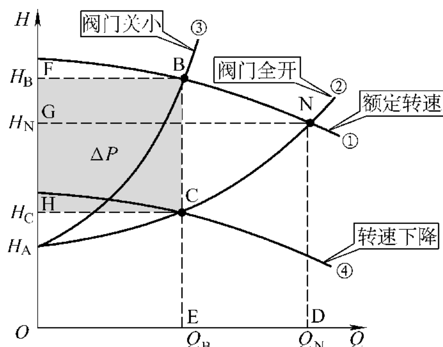


图 8-22　调节流量的方法与比较

仍设用户所需流量由 Q_N 减小为 Q_B，当转速降低时，扬程特性下降为曲线④，管阻特性则仍为曲线②，工作点移至 C 点。

这时：流量减小为 Q_B；扬程减小为 H_C；供水功率 P_C 与面积 OECH 成正比。

3. 两种方法的比较　比较上述两种调节流量的方法，可以看出：在所需流量小于额定流量的情况下，转速控制时的扬程比阀门控制时小得多，两者之差为 ΔH，所以，转速控制方式所需的供水功率也比阀门控制方式小得多。两者之差 ΔP 便是转速控制方式节约的供水功率，它与面积 HCBF（图中的阴影部分）成正比。

在进行比较时，还应注意一个问题：当转速控制采用变频调速时，可以利用变频器的 PID 调节功能，实现恒压供水，始终保持供水

能力与用水需求之间的平衡。但调节阀门时，常常没有这样的控制环节。因此，实际的节能效果往往好于上述分析的结果。

问题 19　从供水功率看，是否流量越小节能越多?

在水泵装置中，就流体功率的节能效果而言，并不是流量越小，节约的功率越多。其物理意义如图 8-23 所示。

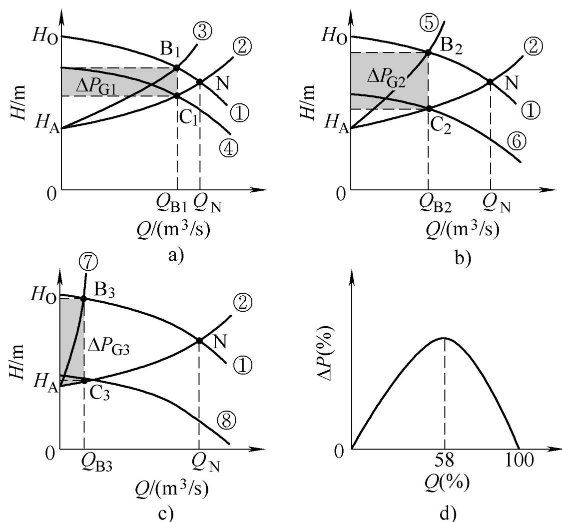


图 8-23　节能与流量（转速）的关系

a）流量下降较少　b）流量下降较多

c）流量下降更多　d）节能与流量

图 8-23a 中，所需流量从额定流量减小为 Q_{B1}，如采用关小阀门开度的办法，则扬程特性仍为曲线①，而管阻特性则改变为曲线③，工作点为 B_1；如采用降低转速的办法，则扬程特性改变为曲线④，而管阻特性仍为曲线②，工作点移至 C_1。节约的流体功率为 ΔP_{G1}，如图 8-23a 中的阴影部分所示。

图 8-23b 中，所需流量进一步减小为 Q_{B2}，如采用关小阀门开度的办法，则扬程特性仍为曲线①，而管阻特性则改变为曲线⑤，工作点移至 B_2；如采用降低转速的办法，则扬程特性改变为曲线⑥，而管阻特性仍为曲线②，工作点移至 C_2。节约的流体功率增大为 ΔP_{G2}，如图 8-23b 中的阴影部分所示。

图 8-23c 中，所需流量再减小为 Q_{B3}，如采用关小阀门开度的办法，则扬程特性仍为曲线①，而管阻特性则改变为曲线⑦，工作点移至 B_3；如采用降低转速的办法，则扬程特性改变为曲线⑧，而管阻特性仍为曲线②，工作点移至 C_3。节约的流体功率减小为 ΔP_{G3}，如图 8-23c 中的阴影部分所示。与图 8-23b 相比较，虽然水泵的流量进一步下降了，但所节约的流体功率反而减小了。

综合起来，则 ΔP_G 与流量（转速）之间的关系如图 8-23d 所示。显然，当流量为 0 和额定流量 Q_N 时，节约的流体功率都为 0。

可以证明，当流量等于额定流量的 58% 时，节约的流体功率为最大。

问题 20　从轴功率看，是否流量越小节能越多？

因为水泵的输出流量是和转速成正比的，流量越小，转速也越低。

由于离心式水泵属于二次方律负载，是迄今为止为广大学者和专家所认同的。因此，由式（8-4）知，当水泵的转速下降时，轴功率将大幅减小。这是水对水泵叶片的阻转矩与转速的二次方成正比的结果。这个规律，与供水管路的结构基本无关。

所以，从轴功率的角度看，当水泵的流量减小时，节约的能量一定是越多的。

问题 21　水泵的轴功率与供水功率之间的差异在哪里？

水泵的轴功率和供水功率之间的差异在于水泵的效率。

1. 水泵工作效率的近似计算公式　据有关资料介绍，水泵工作效率相对值 η^* 的近似计算公式如下：

$$\eta_P^* = C_1\left(\frac{Q^*}{n^*}\right) - C_2\left(\frac{Q^*}{n^*}\right)^2 \tag{8-7}$$

式中　η_P^*、Q^*、n^*——效率、流量和转速的相对值；

C_1、C_2——常数，由制造厂家提供。

C_1 与 C_2 之间，通常遵循如下规律：

$$C_1 - C_2 = 1$$

2. 不同控制方式的水泵效率　由式（8-7）可以作出效率曲线如图 8-24 所示。当通过关小阀门开度来减小流量时，由于转速不变，$n^* = 1$，比值 $Q^*/n^* = Q^*$，可见，随着流量的减小，水泵工作效率

的降低是十分显著的，如图 8-24a 所示。

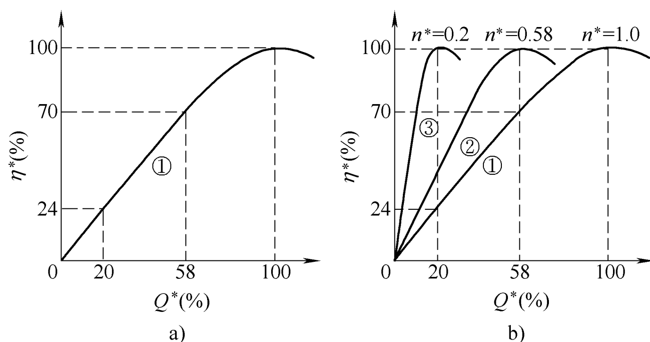


图 8-24　水泵的效率曲线

a）转速不变的效率曲线　b）调节转速的效率曲线

而在转速控制方式时，由于在阀门开度不变的情况下，流量 Q 和转速 n^* 是成正比的，比值 Q/n^* 不变。就是说，采用转速控制方式时，水泵的工作效率总是处于最佳状态，$\eta_P^* = 1$（见图 8-24b）。

问题 22　怎样理解系统中的广义空载功率？

1. 水泵的空载功率　狭义地说，式（8-4）中的空载功率 P_0 是指水泵在空转时损耗的功率，主要是轴上的摩擦损耗和风阻损耗等。

2. 供水系统的空载功率　在供水系统中，首先必须把水压至静扬程后，才能开始向用户供水。在变频调速供水系统中，把水压至静扬程，是需要一定的转速的。而这是向用户供水之前，必须消耗的功率。应该认为是供水系统的空载功率，或者说，是广义的空载功率，用 P_A 表示。

因此，对于一个用于供水的电力拖动系统来说，式（8-4）中的空载功率应该广义地理解为既包括水泵空转时的机械损耗，也包括供水系统的空载功率，从而式（8-4）应改写为

$$P_L = P_A + K_P n_L^3 \qquad (8\text{-}8)$$

式中　P_A——广义的空载功率（kW）。

十分明显的是，广义空载功率所占的比例越大，调节转速所导致的节能效果越差。

问题 23　怎样分析供水管路中的广义空载功率？

供水系统的管路类型有很多，这里只根据静扬程的大小，讨论两种比较典型的情形。

1. 车间供水　绝大多数工厂的车间都是低层建筑，如图 8-25a 所示。供水管路的特点是静扬程 H_{A1} 较小，其管阻特性如图 8-25b 中的曲线②所示，在额定转速时的扬程特性为曲线①，工作点在 B 点，流量为 Q_1。由图 8-25b 可知，如通过降低转速把流量从 Q_1 减少至 Q_2，则扬程特性降至曲线③，转速降至 n_2，工作点移至 C 点。

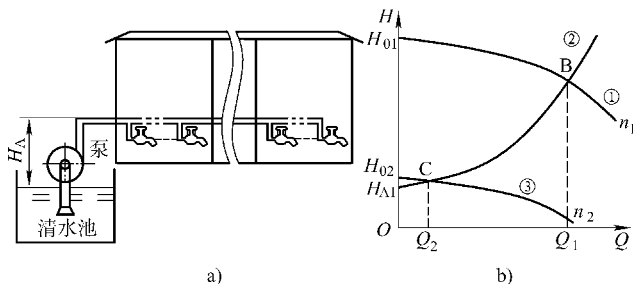


图 8-25　车间供水的特点
a）车间供水示意图　b）特性分析

由图 8-25b 可知，转速调节的范围较大，且流体功率中的空载功率较小，采用变频调速后的节能效果比较显著。

2. 高楼供水　这是许多民用建筑的特点，如图 8-26a 所示。供水管路的特点是静扬程 H_{A2} 较大，其管阻特性如图 8-26b 中的曲线②′所示，在额定转速时的工作点在 B′，流量为 Q_1'。如通过降低转速把流量从 Q_1' 减少至 Q_2'，则扬程特性降至曲线③′，转速降至 n_2'，工作点移至 C′点。

由图 8-26b 可知，与车间供水相比，转速调节的范围小得多，且流体功率中的空载功率较大，采用变频调速后的节能效果相对较差。

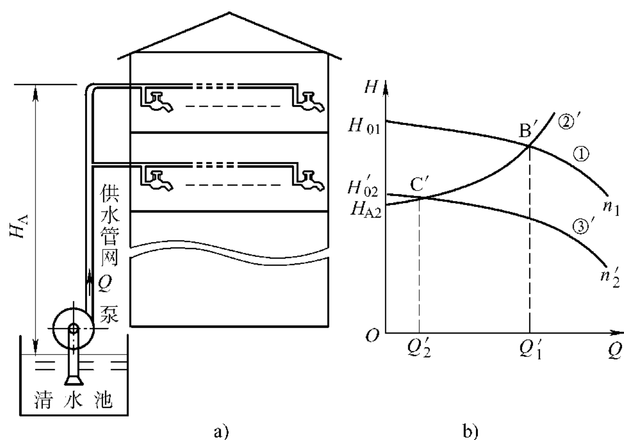


图 8-26　高楼供水的特点

a）高楼供水示意图　b）特性分析

问题 24　怎样分析取水泵站的广义空载功率？

1. 取水泵站的作用与特点　取水泵站在水厂中也叫一级泵站，其作用是把水源的水吸入到净水池。其基本特点是：

（1）取水泵站的水源　在许多情况下，水源常常是大江大河，其水面的水位会随季节而变化。以长江为例，冬季水位和夏季水位之间相差达二十余米，如图 8-27 所示。

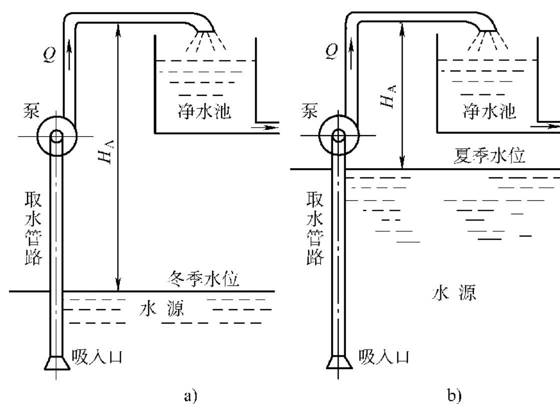


图 8-27　取水泵站的特点

a）冬季水位　b）夏季水位

（2）静态扬程　水源水位的变化将导致静态扬程 H_A 的变化：

冬季的水位较低，静态扬程 H_A 较大，如图 8-27a 所示。广义空载功率 P_A 也较大，节能效果稍差；

夏季的水位较高，静态扬程 H_A 较小，如图 8-27b 所示。广义空载功率 P_A 也较小，节能效果相当显著。

2. 控制特点　因为其出水流量并不如供水系统那样地时刻变化。因此，不必进行恒流量或恒水压的控制。但净水池的水位要求控制在一定范围内。所以，应该进行水位控制。

问题 25　怎样分析循环水系统中的广义空载功率？

1. 循环管路的实例　循环管路主要见于中央空调系统中。中央空调系统主要有三个部分构成，如图 8-28 所示：

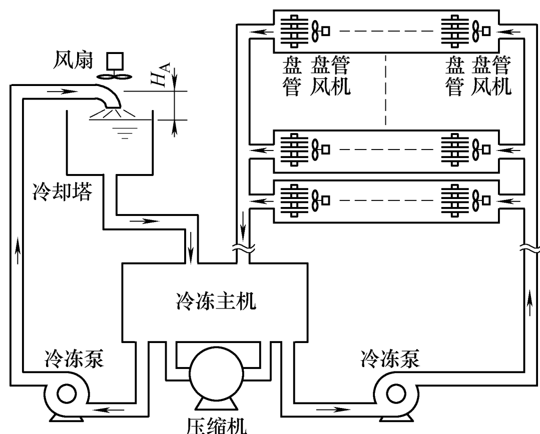


图 8-28　中央空调系统

（1）冷冻主机　冷冻主机是中央空调系统的核心，其任务是把温度较高的水进行热交换后输出冷冻水。

（2）冷冻水循环系统　由冷冻泵及冷冻水管道组成。从冷冻主机流出的冷冻水由冷冻泵加压送入冷冻水管道，通过各房间的盘管，带走房间内的热量，使房间内的温度下降。同时，房间内的热量被冷冻水吸收，使冷冻水的温度升高。温度升高了的循环水经冷冻主机致冷后又成为冷冻水，如此循环不已。

（3）冷却水循环系统　由冷却泵、冷却水管道及冷却塔组成。

冷冻主机在进行热交换、使水温冷却的同时，必将释放大量的热量，使主机本身发热。冷却泵将冷却塔中的冷却水压入冷冻主机，吸收主机所产生的热量，避免主机的温度升高。然后又将升了温的回水由冷却泵压回冷却塔，使之在冷却塔中与大气进行热交换，再将已经降温的冷却水，重新送回到冷冻主机。如此不断循环，带走了冷冻主机释放的热量。

2. 循环水系统的特点　循环水系统犹如一个连通器，在静止状态下，水泵的进水管与出水管中的水平面是相同（冷冻水）或接近于相同（冷却水）的。从而，静态扬程等于或接近于0，由此而引起的结果是：

（1）调速范围宽广　因为 $H_A = 0$（冷冻水）或 $H_A \approx 0$（冷却水），故转速的调节范围将十分宽广，根据实践经验，最低工作频率甚至可达 15Hz 以下。

（2）广义的空载功率很小　$H_A = 0$（冷冻水）或 $H_A \approx 0$（冷却水）的结果是，循环水系统的广义空载功率 P_A 很小，故实现变频调速后的节能效果极好。不少宾馆反映，冷冻水和冷却水系统实现了变频调速后，半年左右就可以回收设备投资。

问题 26　水位控制实现变频调速时也节能吗？

水位控制实现变频调速后同样可以节能，分析如下：

1. 节能分析的依据　在分析变频调速水位控制的节能问题时，应该以在不同转速下提供相同容积的水作为比较的基础。

如图 8-29，设：V 为下限水位与上限水位之间水的容积，Q_1 为转速等于 n_1 时的流量，t_1 为以流量 Q_1 供满容积 V 的水所需的时间；Q_2 为转速等于 n_2 时的流量，t_2 为以流量 Q_2 供满容积 V 的水所需的时间。则：

$$V = Q_1 t_1 = Q_2 t_2 \tag{8-9}$$

2. 节能的计算

（1）不同转速所需时间　由式（8-9）：

$$t_1 = \frac{V}{Q_1} = K_Q \frac{V}{n_1}$$

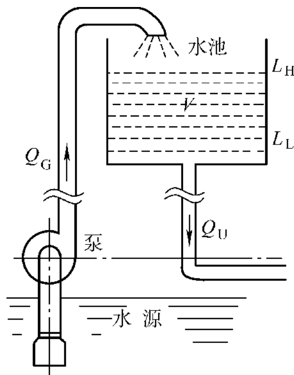


图 8-29　水位控制示意图

$$t_2 = \frac{V}{Q_2} = K_Q \frac{V}{n_2}$$

式中　K_Q——比例常数。

（2）不同转速的运行功率　由式（8-8）：

$$P_{L1} = P_A + K_P n_1^3$$

$$P_{L2} = P_A + K_P n_2^3$$

式中　P_{L1}——以转速 n_1 运行时消耗的电功率（kW）；

P_{L2}——以转速 n_2 运行时消耗的电功率（kW）。

（3）不同转速消耗的电能

$$W_1 = P_{L1} t_1 = P_A t_1 + K_P n_1^3 t_1 = \frac{P_A V}{n_1} + K_P V n_1^2$$

$$W_2 = P_{L2} t_2 = P_A t_2 + K_P n_2^3 t_2 = \frac{P_A V}{n_2} + K_P V n_2^2$$

式中　W_1——以转速 n_1 运行时，提供容积 V 的水所消耗的电能（kWh）；

W_2——以转速 n_2 运行时，提供容积 V 的水所消耗的电能（kWh）。

（4）节约电能

$$\Delta W = W_1 - W_2 = V\left[K_P(n_1^2 - n_2^2) - P_A\left(\frac{1}{n_2} - \frac{1}{n_1}\right)\right] \qquad (8\text{-}10)$$

式中　ΔW——降速运行节约的电能（kWh）。

3. 节能效果分析

（1）由于水位控制时，静扬程一般不大，广义空载功率 P_A 较小，故式（8-10）中的被减数不大。因此，节能效果可以粗略地认为与转速的二次方成正比。

（2）上限水位与下限水位之间相差越大，则节能效果越显著。

问题 27　有三台水泵，平时两台工作，一台备用。若使用三台变频器运行比两台工频运行还节能，如何解释？

假设每台的额定功率为 P_N，额定流量为 Q_N。又假设在两台工作时，都处于满负荷状态。则用水流量为 $2Q_N$，这时：

1. 两台工频泵消耗的功率

$$P_{\Sigma 1} = 2P_N$$

2. 三台变频消耗的功率　三台变频时，每台水泵提供的流量均为 $2Q_N \div 3 \approx 0.7Q_N$，每台变频器的工作频率都是 $50 \times 0.7 = 35$Hz。忽略水泵的空载损耗，则三台水泵消耗的总功率为：

$$P_{\Sigma 2} = 3 \times 0.7^3 P_N = 1.029 P_N$$

可见，“三台变频”控制方式所消耗的功率，几乎只有两台工频方式的一半多一点，节能效果由此可见。

8.3　风机运行的节能分析

问题 28　怎样描绘风机的工作特点?

1. 风机的主要参数

（1）风压　是管路中，单位面积上风的压力，用 H_F 表示；

（2）风量　即空气的流量，指单位时间内排出气体的量，用 Q_F 表示。

2. 风压特性　在转速不变的情况下，风压 P_F 和风量 Q_F 之间的关系曲线，称为风压特性曲线，如图 8-30b 中之曲线①所示。风压特性呈中间高、两边低的形状。这是因为：在风量很小时，风压也较小；随着风量的增大，风压也逐渐增大，但增大到一定程度后，风量再增大，风压又开始减小。

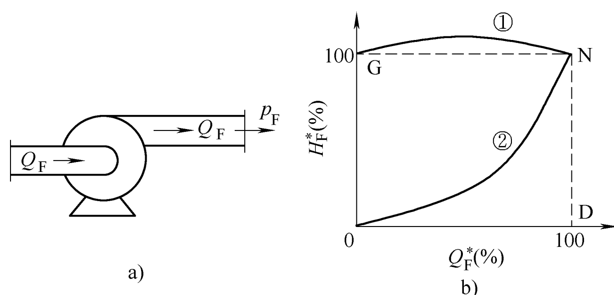


图 8-30　风机的特性

a）风机示意图　b）主要特性曲线

3. 风阻特性　在风门开度不变的情况下，表示风量与风压关系的曲线，如图 8-30b 中之曲线②所示。当风压等于 0 时，风量也等于 0，故风阻特性通过坐标原点。

4. 通风系统的工作点　风压特性与风阻特性的交点，即为通风系统的工作点，如图 8-30b 中之 N 点。

5. 风机的耗用功率　粗略计算如下：

$$P_F = \frac{H_F Q_F}{102} \tag{8-11}$$

式中　P_F——风机的耗用功率（kW）；

H_F——风压（kgf/m^2）；

Q_F——风量（m^3/s）。

问题 29　某风机原来是全速运行的，欲改成变频调速，怎样分析其节能效果？

1. 从风压-风阻特性看节能效果

（1）全速运行时的耗用功率　图 8-31a 曲线①是全速运行时的风压特性，曲线②是风阻特性，工作点为 N 点。这时：

风量为 Q_{FN}，风压为 H_{FN}，耗用功率与面积 ODNE 成正比。

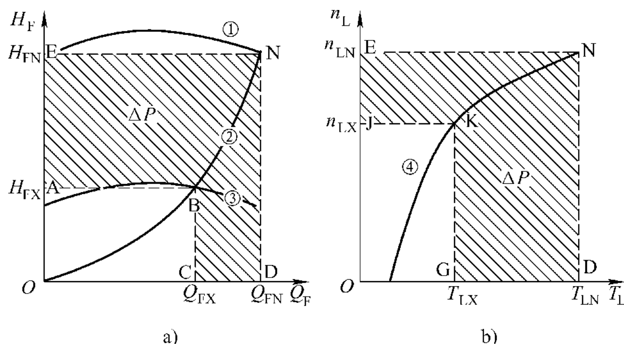


图 8-31　风机变频调速的节能效果

a）从风压—风阻特性看　b）从机械特性看

（2）风量减小后的耗用功率　假设所需风量减少为 Q_{FX}，通过变频调速的方法来实现，降速后的风压特性如曲线③所示。这时：

风量为 Q_{FX}，风压为 H_{FX}，耗用功率与面积 OCBA 成正比。

（3）节约功率　以上两者比较，则节约的功率与面积 CDNEABC 成正比。由图可知，虽然风量减少不多，但节约的功率却是十分可观的。

2. 从机械特性看节能效果　风机的机械特性如图 8-31b 所示。由

于机械功率与转矩和转速的乘积成正比，所以：

（1）全速运行时的耗用功率　风机在额定转速 n_{LN} 下运行时，负载转矩为 T_{LN}，故耗用功率 P_N 与面积ODNE成正比；

（2）减速后的耗用功率　因为风量大小是与转速成正比的，所以，与 Q_{FX} 对应的转速是 n_{LX}，转矩是 T_{LX}，耗用功率与面积OGKJ成正比；

（3）节约功率　以上两者相减，则节约的功率与面积GDNEJKG成正比。

比较图a与图b可知，两种方法的分析结果是十分接近的。至于具体的节能比例，要根据平均风量的大小来决定。

问题30　某风机原来用风门调节风量，欲改成变频调速，节能效果如何？

仍以所需风量为 Q_{FX} 为例，如图8-32所示，分析如下：

1. 关小风门时的消耗功率　风机全速运行，风门关小后，风阻特性由曲线②移至曲线④，工作点移至F点，风压为 H'_{FX}，消耗功率与面积OCFG成正比；

2. 调节转速时的消耗功率　风门全部打开，转速减小后，风压特性由曲线①移至曲线③，工作点移至B点，风压为 H''_{FX}，消耗功率与面积OCBA成正比；

3. 节能效果　对以上两者进行比较后可知，节约的功率与面积ABFG成正比。可见，节能效果也是相当可观的。

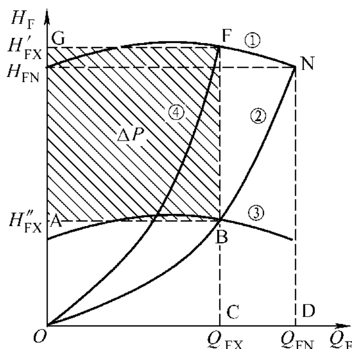


图8-32　风机变频调速的节能效果（与调节风门比较）

问题31　某风机配用了变频器，绝大多数时间都只能在50Hz下运行，但电动机的裕量较大，50Hz时的负载率只有75%（$\beta=0.75$），能否使它节能？

可以通过增大基本频率，降低与50Hz对应的电压，使"大马拉小车"的状态得到改善。

1. 基本分析

∵　$\beta = \frac{T_L}{T_{MN}} = 0.75$

∴　$T_L = 0.75T_{MN}$

因为电动机的临界转矩是和电压的二次方成正比的，所以，实际所需电压为

$$\begin{aligned} U_X &= \sqrt{0.75}U_N \\ &= 0.87U_N \\ &= 0.87 \times 380 = 330\text{V} \end{aligned}$$

就是说，如果与 50Hz 对应的电压等于 330V 的话，电动机的有效转矩将与负载的额定转矩相等，从而消除了“大马拉小车”的状态。

2. 实施方法　将变频器的基本频率预置为 58Hz 就可以了，如图 8-33a 所示。

这时，与 58Hz 对应的电压是 380V，而与 50Hz 对应的电压便只有 330V 了。

3. 机械特性　如图 8-33b 所示，曲线①是额定状态（电压为 380V）下的机械特性，电动机的额定转矩是 T_{MN}，大于负载的额定转矩 T_{LN}。

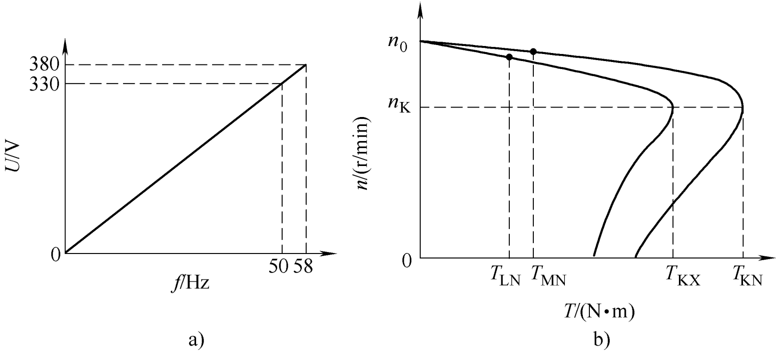


图 8-33　降低 50Hz 对应的电压

a）增大基本频率　b）机械特性曲线

曲线②是电压为 330V 时的机械特性，其有效转矩与负载的额定转矩 T_{LN}接近相等，消除了“大马拉小车”的状态，提高了电动机的

功率因数与效率，实现了节能。

8.4 充分利用拖动系统释放的能量

问题32 拖动系统在哪些情况下会释放能量？

在变频调速系统里，释放能量主要有两种情况：

1. 电动机的工作频率下降　在变频调速系统中，转速的下降是通过降低频率来实现的。假设电动机在较高频率下运行，其转速也较高。当降低频率时，同步转速随即减小。但电动机的转子却因为有惯性，并不立刻下降。于是出现了同步转速低于转子转速的状态，即发电机状态，或称再生制动状态，如图8-34a所示。

当拖动系统在较高频率下运行时，动能较大。而在频率下降的过程中，因为转速在降低，故拖动系统的动能也在减小。所以，频率下降的过程，也是拖动系统释放动能的过程。

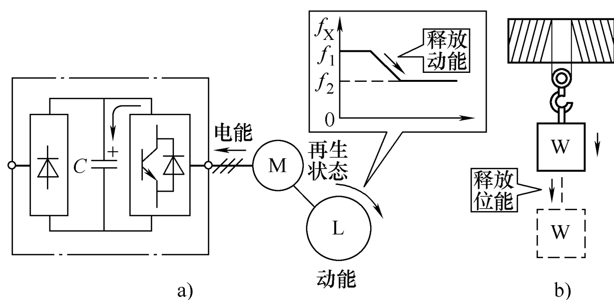


图8-34　异步电动机的发电状态

a）释放动能　b）释放位能

2. 起重机械的重物下降　重物下降时，在重物的重力加速度作用下，转子的转速也有可能超过同步转速，而使电动机处于发电机状态。重物在高处时，位能较大，重物下降时，位能将减小。所以，重物下降的过程，也是拖动系统释放位能的过程，如图b所示。因为这时电机里的电磁转矩是制动转矩，所以，也称为再生制动状态。

拖动系统在释放能量的过程中，所释放的能量将转换成电能而反馈到变频器的直流回路，使直流电压升高。

问题 33　多台变频器共母线可以节能吗？

如果一台机器上有多台变频器的话，可以把这些变频器的直流母线都并联起来，如图 8-35 所示。这样做的好处是：

（1）增大了直流电源的总容量，减缓了直流电压的上升。

（2）实现了能量的互补，因为多台电动机不大可能同时处于再生制动状态。于是，处于再生制动状态的电动机发出来的电，可以被其他电动机利用。

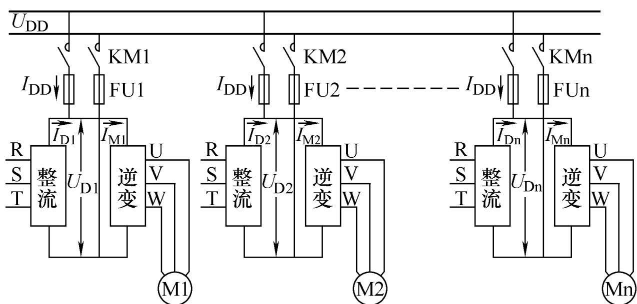


图 8-35　直流母线并联

问题 34　拖动系统释放的能量能否反馈到电源？

可以的，这需要采用‘回馈单元’。所谓回馈单元，实际上也是一组三相逆变桥。当直流回路的电压超过某一限值时，可以把直流电通过回馈单元逆变成三相交流电，并反馈到电网去，如图 8-36 所示。实际上相当于把拖动系统在运行过程中释放的能量（动能或位能）通过电动机转换成电能，又通过回馈单元反馈给电网。所以，是一种非常理想的节能方法。

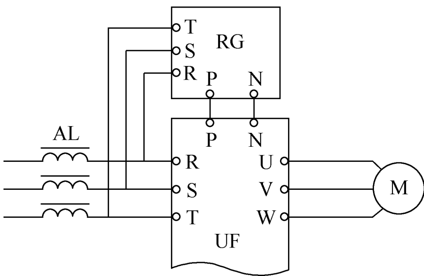


图 8-36　回馈单元的接线

在这里，交流电抗器 AL 是必须的，它能防止因逆变桥逆变出的电压波形与电网电压的波形不相同而产生的电流冲击。

8.5　变频调速的经济效益

问题35　怎样估价因减少故障率产生的经济效益？

直流电动机的调速性能虽然优越，但它的故障率很高。每次发生故障，必将造成如下损失：

（1）正在加工过程中的工件将报废造成的损失；

（2）在处理和维修期间，不能进行生产造成的损失；

（3）维修费用本身的损失，等等。

例如，印染机械通常由若干个单元构成，各单元之间要求布速同步。过去采用直流电动机控制，故障率较高。改造为变频调速后，连续若干年未发生故障。某印染厂的厂长说，过去用直流电动机，平均一个月要发生一次故障。每发生一次故障，所造成的损失（包括整匹布报废的损失、在一段时间内不能生产造成的损失以及修理费用等）足以购买许多台变频器，其经济效益由此可见。

问题36　采用变频调速后机械的寿命能提高吗？

主要有以下两种情形：

1. 由于平均转速下降而使设备寿命延长　如风机、水泵、空气压缩机等在全速运行时，由于阻转矩很大，各部分的磨损以及主要部件所受到的应力都很大。采用了变频调速后，由于平均转速的降低，应力和磨损都大为减小，使机器的寿命得到延长。

2. 由于起动和停机过程得到改善而使设备寿命延长　许多设备在直接起动和停机时，将因受到较大冲击而影响其使用寿命；

各种设备中的压缩机在直接起动和停机时，因内部压力变化过大而影响使用寿命；

3. 其他方面　直接起动将使供水的管道系统产生水锤效应，使阀门、接头和水管受到损坏，等等。

采用变频调速后，由于加速和减速过程可以预置得比较缓慢，从而彻底地消除了水锤效应，延长了水泵和管道系统的寿命。

这方面尚无准确的统计数字，但据部分用户反映，设备的使用寿命至少延长一倍以上。毫无疑问，这也是一种相当可观的经济效益。

问题37　变频调速能提高产品质量吗？

主要有如下几个方面：

1. 因实现无级调速而使质量提高　例如，某厂用于研磨轴承外圆的无心磨床，原来是齿轮调速，其转速不可能调得恰到好处。配用变频调速后，操作人员可以一边观察火花，一边调节转速，可以使加工过程达到最佳状态，从而减小了轴承表面的粗糙度；

2. 因实现了闭环控制而使质量提高　例如，某塑料厂的空气压缩机配用变频器后，实现了恒压供气，产品质量因压缩空气的压力稳定而得到了提高；

3. 因检测准确而使质量提高　例如，某纺织厂的浆纱机，有十二个单元同步运行，原来凭手感通过调整锥形皮带来进行微调。非但费力，且调整的精度难以控制。采用了变频调速后，可使变频器显示输出电流，通过观察各单元电动机的电流大小作为进行微调的依据。非但调节方便，并且使产品的档次得到了提高，等等。

产品的质量提高了，其价值也必升高，经济效益难以估量。

问题 38　变频调速还有哪些经济效益？

例如，某钢厂的轧钢设备，通过燃烧重油来加热钢材。原来由人工控制，非但费油，并且烟囱里黑烟滚滚，常被环保部门罚款。配用了变频器后，实现了恒压供油，既节省了重油，烟囱里不冒黑烟了，也不再被罚款了。

又如，某厂锅炉的鼓风机和引风机在采用了变频调速后，非但节省了电和煤、烟囱里冒白烟，并且由于风机的转速下降了，噪声也大为减小。

这无疑也是不容小视的经济效益。

问题 39　怎样评估变频空调的经济效益？

1. 节约电能　空调机实现变频调速后，其平均转速将有较大幅度的下降，从而具有较好的节能效果。

2. 电动机的寿命延长　居民用电都是单相交流电，故家用电器中的电动机都是单相电动机，其转矩小，效率低，而故障率高。

采用变频调速后，由于变频器是“单进三出”的，如图 8-37 所示，故可采用三相电动机，其各方面性能都有所提高。

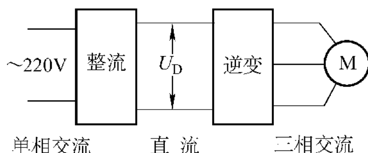


图 8-37　单进三出变频器

3. 压缩机的寿命延长　这有两个方面：

（1）起动和停止过程缓和　工频运行时，压缩机的开机和停机，都是速开、速停，这将影响压缩机的使用寿命。采用变频调速后，由于可以实现软起动和软停止，压缩机不受冲击，非但因减小了起动电流而节能，还延长了压缩机的寿命。

（2）减小机械磨损　因为压缩机的平均转速下降了，机械磨损大为减轻，从而延长了压缩机的寿命。

4. 温度调节的质量提高　据有关部门测试，未使用变频调速的空调机，室内温度的变化幅度约为 1～2℃；而使用变频调速后，温度基本恒定、感觉舒适。

第 9 章　变频器的保护功能与故障分析

9.1　变频器的过载保护

问题 1　过载保护的对象是什么？

变频器的过载保护功能是用来保护电动机过载的。即负载转矩（折算值）超过了电动机的额定转矩：

$$T_L' > T_{MN}$$

在变频调速电路中，由变频器的输出电流具体地反映出来，如图 9-1 所示。

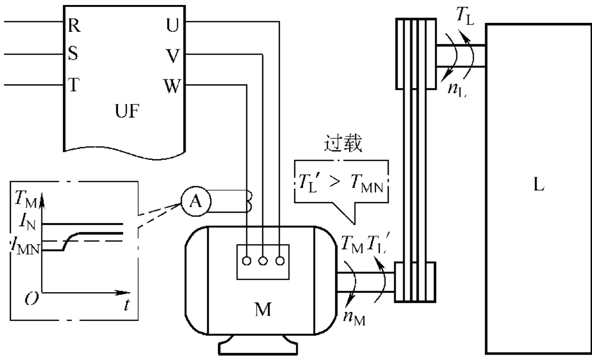


图 9-1　电动机过载的特点

电动机根据其发热情况是允许短时间过载的。由于发热时间常数较长，所以，电动机的所谓短时间过载，一般都在数分钟以上。而变频器所能允许的“过载能力”，通常只有 1min（150%），它只是在电动机的起动过程中才有意义。而对于电动机在运行过程中的过载来说，实际上并不起作用。

因此，电动机的过载电流应该在变频器的额定电流范围内。

问题 2　在哪些情况下电动机的过载是允许的？

如图 9-2 所示，主要有：

1. 电动机的短时间过载　变频器的输出电流已经超过了电动机

的额定电流，但并未超过变频器的额定电流。则只要电动机的温升未超过额定值，变频器将不作反应，如图 a 所示。

2. 短时间的冲击过载　电动机在运行过程中有可能遇到短时间的冲击过载，只要冲击电流的峰值不超过变频器的过载能力，持续时间不超过 1min，变频器也将不作反应，如图 b 所示。

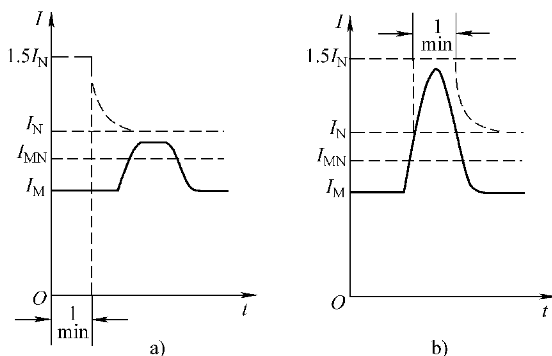


图 9-2　变频器允许的过载电流

a）电动机短时间过载　b）短时间冲击电流

问题 3　变频器怎样判断电动机是否过载？

不同的变频器预置电动机额定电流的方法不尽相同，主要有：

1. 直接预置法　即直接向变频器预置电动机的额定电流。例如，艾默生 TD3000 系列变频器，功能码 F1. 03 即用于预置“电动机额定电流”。

2. 间接预置法　考虑到：

（1）在某些情况下，变频器的容量需要比电动机的容量加大一挡；

（2）即使变频器的容量与电动机的容量相吻合，但不同变频器的额定电流并不一致；同容量电动机在磁极对数不同的情况下，额定电流也不相等。

因此，须向变频器预置“电流取用比”：

$$I_M\% = \frac{I_{MN}}{I_N} \times 100\% \tag{9-1}$$

式中　$I_M\%$——电流取用比；

I_N——变频器的额定电流（A）。

例如，康沃 CVF—G2 系列变频器中，功能码 H—2 预置“电动机保护系数”，其含义与电流取用比相同。

问题 4　过载保护有什么特点？

主要特点如下：

1. 反时限特性　即，过载电流越大，允许运行的时间越短，其保护曲线如图 9-3a 所示。图中，横坐标是电动机的电流负荷率：

$$\beta_I = \frac{I_M}{I_{MN}} \tag{9-2}$$

式中　β_I——电动机的电流负荷率；

I_M——电动机的运行电流（A）；

I_{MN}——电动机的额定电流（A）。

纵坐标是变频器的跳闸时间 t_T，也就是允许运行的时间。

由图知，当 $\beta_I > 1.0$ 时：

如　$\beta_3 > \beta_2 > \beta_1$

则　$t_3 < t_2 < t_1$

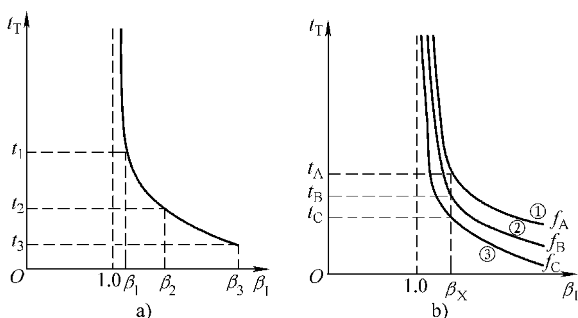


图 9-3　过载时的热保护曲线

a）反时限特性　b）变频器的热保护功能

2. 保护曲线与工作频率有关　因为工作频率越低，电动机的散热越差，故在过载程度相同的情况下，允许运行的时间（即跳闸时间）越短，如图 b 中之曲线①、曲线②和曲线③所示。由图知，在电流负荷率相同（都等于 β_X）的情况下：

如　$f_C < f_B < f_A$

则　$t_C < t_B < t_A$

问题5　变频器的热保护功能和热继电器有什么区别?

1. 相同点　都具有反时限特性，即：过载越严重（电流越大），允许运行的时间越短。

2. 不同点

（1）热继电器发热元件的时间常数与电动机的发热时间常数不可能十分接近；但变频器则是通过微机人为地进行计算的，准确度较高。

（2）变频器可以针对不同的工作频率，自动地调整保护曲线，热继电器则不可能自动调整。

问题6　变频器输出电流过载一定是负载过重吗?

不一定。从电动机的运行规律看，在负载不变的情况下，如果变频器的输出电压偏低，也会使电流增大，可能导致过载。

变频器输出电压偏低的可能原因及对策如下：

1. 电源电压偏低　因为变频器在额定频率下的最大输出电压总是等于电源电压的，所以，如果电源电压偏低，输出电压也必然偏低。

解决的方法是将变频器的自动电压调整（AVR）功能预置为“有效”。这样，在频率低于额定频率时，变频器具有自动稳压的功能。即，如果输出电压偏低的话，变频器将自动升高其输出电压。

2. 转矩提升功能预置不当　U/f 太大，会使电动机的磁路饱和，励磁电流的峰值过大而导致过载；反之，U/f 太小，磁通过低，电流也会增大。

3. 载波频率偏高　载波频率偏高时，逆变管交替导通时死区的总时间将增加，变频器的平均输出电压将降低。因此，在电动机的电磁噪声小于机械本身的噪声时，可尽量降低载波频率。

除此以外，如果对“电流取用比”预置不当，也会造成过载的误动作。

9.2　变频器的过电流保护

问题7　“过电流保护”与“过载保护”有什么区别?

1. 电流的保护界限不同　过电流的保护对象是变频器自身。因此，基本特征是工作电流超过了变频器的额定电流：

$$I > I_N$$

2. 增加了检测位置　由于产生过电流的原因，除了输出侧工作不正常外，也有可能是因为变频器内部的不正常所引起。所以，判断过电流的依据，除了输出电流外，还必须同时检测输入电流，如图 9-4 所示。

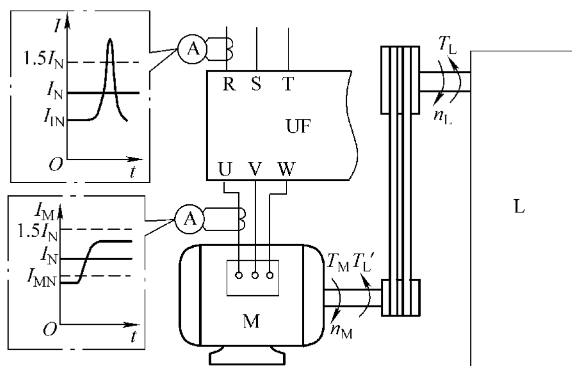


图 9-4　变频器的过电流

3. 变频器的处理方法不同　过载保护如上述，按反时限特性进行保护；过电流保护则根据不同情况分别进行处理：

（1）如在升速或运行过程中发生过电流，但尚未超过变频器的过载能力，则可以通过“防止跳闸功能”进行自处理；

（2）当电流超过了变频器的过载能力时，则必须立即跳闸。

问题 8　怎样判断变频器输出端的短路故障？

现代的变频器保护功能都十分完善，即使输出侧短路也不会损坏变频器。所以，在未找出原因的情况下，可以重新通电后再做试验。但再试验时必须注意输入侧电压表的反映。如果在继电器 KA 的触点闭合，起动电动机的瞬间，输入侧电压表的读数有所减小，说明变频器的输出侧发生了短路，应立即进行检查（见图 9-5）。

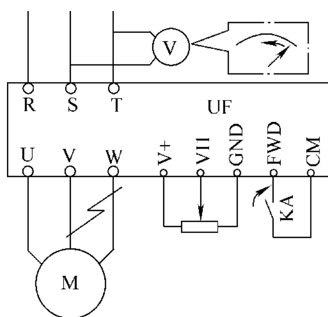


图 9-5　输出侧短路

问题 9　在哪些情况下可能导致变频器的逆变桥“直通”?

逆变管直通的原因，大致有以下几个方面：

1. 关断时间延长　逆变管的关断时间如果延长到超过死区时间时，同一桥臂的两个逆变管在交替导通过程中就容易发生直通，如图 9-6 所示。导致关断时间延长的原因主要有：

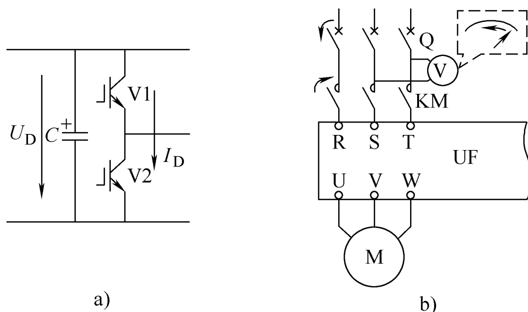


图 9-6　变频器的逆变电路直通

a）逆变管直通　b）直通的反映

（1）环境温度过高　随着环境温度的升高，逆变管的关断时间将延长，当关断时间等于或超过死区时，逆变管将直通。

（2）输出电流太大　输出电流越大，关断时间也越长，容易导致逆变管直通。

（3）逆变管老化　逆变管老化后，IGBT 的关断时间也会延长，导致逆变管直通。

2. 逆变管进入放大区　如果逆变管进入放大区，功耗将大大超过其额定值，该逆变管将迅速损坏，而同一桥臂中，只要有一个逆变管损坏，另一个一旦导通，也必跟着损坏，形成直通。导致逆变管进入放大区的可能原因有：

（1）驱动电路的电源电压下降；

（2）逆变管老化。

3. 计算机运算紊乱　如由于某种原因，使计算机的软件出错，运算结果发生紊乱，也可能导致逆变管直通。

问题 10　变频器的功能预置不当会形成过电流吗?

变频器因功能预置不当而形成过电流的情形主要有以下两种：

1. 加速时间预置过短　当加速时间太短时，电动机转子的转速因跟不上频率的上升而产生过电流，如图 9-7a 和 b 所示。

2. 转矩提升预置不当　这是比较常见的情形。例如，电动机的负载是二次方律负载，其机械特性如图 9-7d 中之曲线④所示。当频率较低，为 f_X 时，负载转矩 T_{LX} 是很小的。如果转矩提升（U/f）预置较大，如图 c 中之曲线②（曲线①是转矩提升为 0 时的 U/f 线），则电动机的有效转矩线如图 d 中之曲线③所示。当频率为 f_X 时，电动机的有效转矩 T_{MX} 比 T_{LX} 大得多，电动机处于严重轻载的状态，磁路严重饱和，励磁电流的波形严重畸变，其峰值有可能超过变频器的过载能力，并导致跳闸，如图 e 所示。

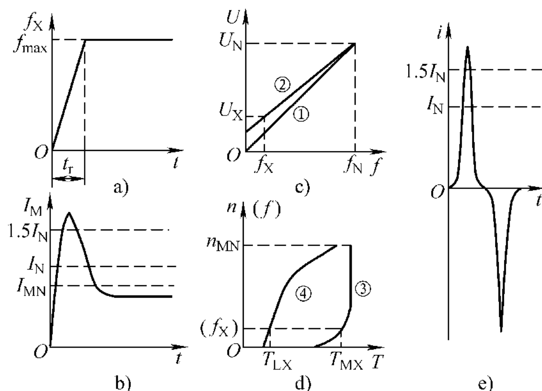


图 9-7　功能预置不当形成的过电流

a）加速时间　b）加速电流　c）压频比的预置

d）严重轻载　e）磁路饱和后的励磁电流

问题 11　电动机在过载情况下有可能因过电流而跳闸吗？

在以下情况下，是有可能因过电流而跳闸的：

1. 长时间超过变频器额定电流　如果在变频器选型时不注意分析负载的工作特点，简单地按变频器说明书的“配用电动机容量”来决定变频器的容量。则变频器的额定电流有时与电动机额定电流十分接近，电动机稍有过载时，也超过了变频器的额定电流。当过载的时间超过了变频器允许的承受时间后，变频器即判断为“过电流”，如图 9-8a 所示。

2. 电动机遇到冲击负载　当电动机由于某种原因而遇到冲击负

载时，如果冲击电流的峰值超过了变频器的过载能力（额定电流的 1.5 倍）时，变频器将因过电流而跳闸，如图 b 所示。

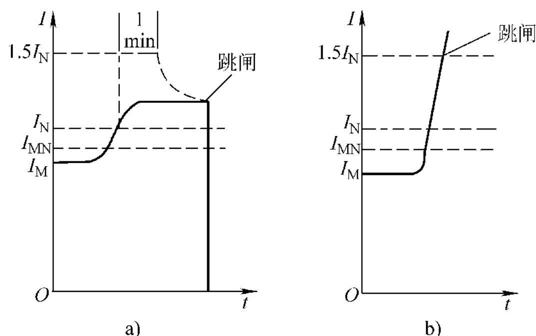


图 9-8　运行过程中的过电流

a）超过变频器额定电流时间较长　b）冲击负载

问题 12　怎样判断因变频器内部的检测异常而导致的过电流?

如果电动机的负载很正常，变频器的内外电路也都无异常现象，而变频器却经常发生因过电流而跳闸。

遇到这种情况，应使变频器显示输出电流，观察是否真的过电流。如果显示电流的确很大，但负载又较轻，则首先检查转矩提升是否预置得太大。

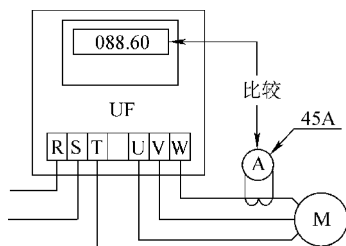


图 9-9　检测异常引起的过电流

如果转矩提升并不大，则有必要在外部实际测量一下变频器的输出电流，如图 9-9 所示。如果实测电流与变频器的显示电流差异较大，则需要检查变频器内部的电流检测系统是否异常？因为变频器是根据自身测量出来的电流进行判断和保护的。

问题 13　变频器一接通电源就“过电流”跳闸，是什么原因?

1. 主电路的原因　变频器在发生故障进行保护时，将立即封锁六个逆变管。因此，如果空气断路器和快速熔断器都无反映的话，说明逆变管损坏的可能性较大。

2. 检测和控制电路的原因　如经过检查，逆变管全部正常，则应检查检测电路和控制电路。

首先将检测电路和主控板之间的接插件脱开，重新接通电源，如不再发生“过电流”，则说明问题在检测部分；如果仍然因“过电流”而跳闸，则说明主控板工作不正常。

问题 14　变频器在哪些情况下发生过电流可以不跳闸?

因为变频器每次跳闸，都会给生产带来损失。所以，对于某些由于非故障原因引起的过电流，变频器尽量采取一些自行消除过电流的措施，以避免跳闸。在许多说明书里，把这种防止跳闸的自处理功能，称为防失速功能。

1. 加速过程防止跳闸功能　如图 9-10a，当变频器的输出电流超过变频器的额定电流（或由用户自行设定的电流值）时，变频器就自动地延长加速时间（或暂停加速），待加速电流减小到额定值以内后，再恢复原来的加速时间。如此反复，直至加速到给定频率为止。

2. 运行中防止跳闸功能　在运行过程中，如由于某种原因，运行电流超过了变频器的额定电流，则变频器可自行适当降低运行频率，如图 9-10b 所示。这种方法在二次方律负载中尤为见效，如图 9-10c 所示。

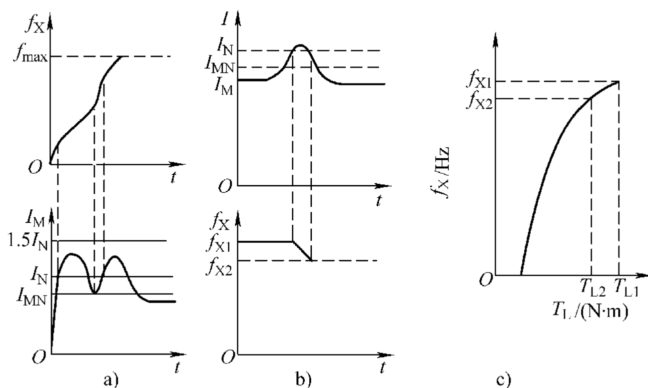


图 9-10　变频器的过电流自处理功能

a）加速自处理　b）运行自处理　c）降频减负原理

问题 15　如果生产机械要求的加速时间很短，而电力拖动系统的惯性又很大，怎么办?

在这种情况下，为了满足生产机械所需要的加速时间，又使变频器在加速过程中不因过电流而跳闸，可以采取的措施有：

（1）预置加速过程防止跳闸功能　但变频器在执行防止跳闸功能时，实际上把加速时间延长了，应注意测定加速时间是否满足要求。

（2）加大变频器的容量　如果在预置加速过程防止跳闸功能后，实际加速时间不能满足生产机械要求的话，应考虑把变频器的容量加大一挡。

9.3　变频器的过电压和欠电压保护

问题 16　导致变频器过电压的原因有哪些?

主要原因有以下几种：

1. 电源过电压（见图 9-11a）　这种现象并不多见。因为进口变频器的电压上限常常设定在直流电压 700V 以上，相当于电源电压 500V 左右。比 380V 超过了 30% 以上，这在我国是很少见的。

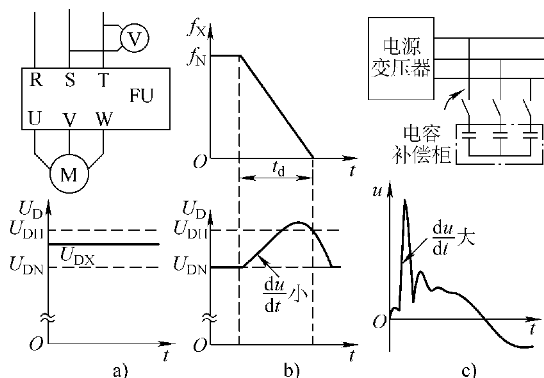


图 9-11　过电压的原因

a）电源过电压　b）减速过电压　c）投入补偿电容

但个别单位，由于变压器在夜间的负载与白天相比，相差很远，变压器的输出电压过高，导致跳闸的情形也并非没有。

2. 减速过电压　变频器的输出频率在下降过程中，电动机处于再生制动状态，使变频器的直流回路中产生泵升电压。如果减速时间预置得太短，则在减速过程中泵升电压较大，导致直流电压超过上限值，如图 9-11b 所示。

3. 投入补偿电容　当变电所内的补偿电容柜刚投入时，变压器的输出电压将有一个过渡过程，在过渡过程中，变压器输出电压的波形将发生畸变，产生很高的尖峰电压，足以使变频器跳闸，如图 9-11c 所示。

问题 17　针对上述过电压原因，变频器可以采取哪些对策？

1. 电源过电压

（1）如果电压的最高峰值超过标准在 10V 以内，可以通过在输入侧接入交流电抗器来适当降低变频器的输入电压。

（2）如果超过标准太多，则只有设法调整变压器的输出电压了。

2. 减速过电压　可以采取的措施有：

（1）预置减速自处理功能（见图 9-12a）　当变频器的直流电压超过变频器的上限值时，变频器就自动地延长减速时间（或暂停减速），待直流电压减小到正常值以内后，再恢复原来的减速时间。如此反复，直至减速到给定频率为止。

（2）接入制动电阻和制动单元　一般说来，接入制动电阻和制动单元后，可以有效地防止直流电路的过电压，如图 9-12b 所示。

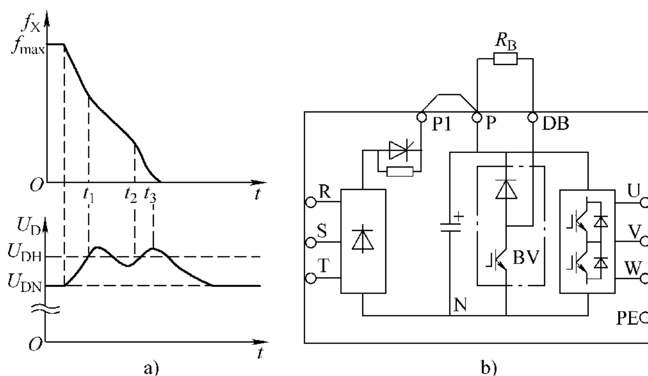


图 9-12　减速防止跳闸措施

a）自处理功能　b）接入制动电阻和制动单元

如果原来已经接入了制动电阻和制动单元，而变频器仍因过电压跳闸，则应适当减小制动电阻值。

3. 投入补偿电容引起的过电压　由于过电压的时间很短，并且在 1 ~ 2 个周期内即可消失，故可以通过预置“重合闸”功能来解决（“重合闸”功能的含义见下述）。

问题 18　导致变频器欠电压的原因有哪些？

如图 9-13，主要有如下几种情况：

1. 限流电阻损坏（见图 a）　当限流电阻损坏后，滤波电容将不能充电，故变频器判断为欠电压。

2. 电源缺相　当电源电压缺相后，整流电路变成了单相全波整流，其平均值将只有 342V（如图 b），远低于正常直流电压。

3. 其他设备的干扰　例如，附近有容量较大的晶闸管设备，则在晶闸管导通的瞬间，电源电压将出现下降的凹口，如图 c 所示，使变频器瞬时欠电压。

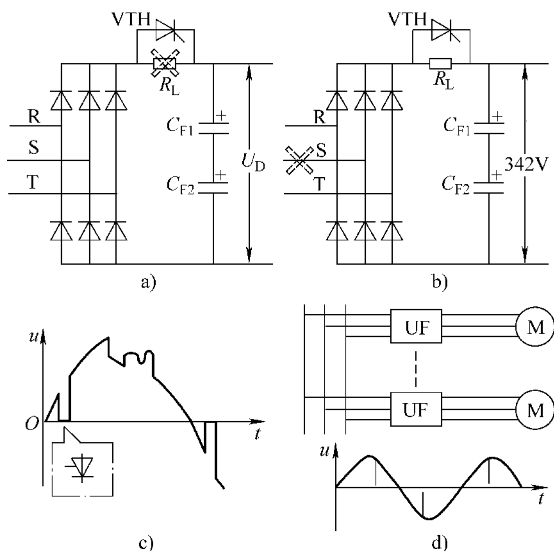


图 9-13　欠电压的原因

a）限流电阻损坏　b）缺相

c）干扰　d）互相干扰

4. 变频器的互相干扰　在变频器台数很多时，电网电压将会出现时间极短的不规则下降，如图 d 所示。

对于干扰形成的瞬间欠电压，宏观上不会使直流电压有较大的下降，不应该影响电动机的运行。但由于滤波用的电解电容器不能很好地吸收瞬间欠电压，而电压检测电路的灵敏度又较高，使这些瞬间欠电压常常被检测到而导致跳闸。针对这种情形，也可以通过预置“重合闸”功能来解决。

问题 19　限流电阻损坏的原因有哪些?

归根结底，这和限流电阻的容量选择有关。说明如下：

1. 限流电阻的容量选择（图 9-14）

（1）限流电阻的耗用功率　假设限流电阻 R_L 的取值为：

$$R_L = 20\Omega$$

则滤波电容器在充电过程中消耗在限流电阻上的平均功率为

$$P_L = \frac{U_D^2}{2R_L} \approx 7\text{kW}$$

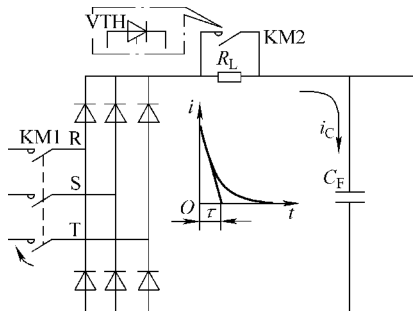


图 9-14　限流电路

（2）限流电阻的通电时间　假设滤波电容器的电容量 C_F 为

$$C_F = 5000\mu\text{F}$$

则充电时间常数 τ 为：

$$\tau = R_L C_F = 20 \times 5000 = 100000\mu\text{s} = 0.1\text{s}$$

在这么短的时间里，电阻是来不及发热的。所以，实际选择的限流电阻的容量比上面的计算值小得多，常常只有几十瓦。

但有些变频器中限流电阻的容量选得太小，容易经不起非正常的工况。例如，由于某种原因，用于限流电阻“切除”电路的短路器件（接触器或晶闸管）导通得迟了一点，限流电阻就容易损坏。

2. 电动机的起动方法不当　某些用户常常通过接通变频器电源来起动电动机，如果起动次数比较频繁的话，由于变频器机箱内温度较高，限流电阻的散热较慢，热量容易积累，也就容易损坏。

3. 短路器件损坏　常用的把限流电阻“切出”电路的短路器件

是接触器和晶闸管，如图 9-13a 中之 VTH，如果 VTH 损坏了，变频器接通电源后，限流电阻将因长时间接在电路中而很快烧坏。

问题 20　变频器在切断电源后为什么显示“UL”（欠压）？

变频器内部，由于控制电路中的微机对电源稳定度的要求较高，故控制电路的电源中，滤波电容器的总容量很大，过渡过程的时间常数较长。在切断电源后，控制电路的电压在相当长时间（如图中之 t_C）内，几乎并不下降，如图 9-15b 所示。因此，在这段时间内，控制电路仍在正常地工作。

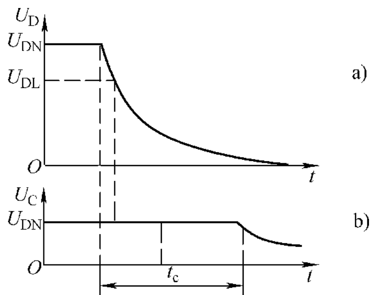


图 9-15　变频器断电后
a）直流电压　b）控制电压

但直流高压回路的电压却下降较快，如图 9-15a 所示。当直流电压下降到欠压保护的限值 U_{DL}时，微机将判断为发生了欠电压故障，所以显示“UL”。

问题 21　许多变频器对于直流电压的下限值定得很低，是什么原因？

不少变频器的直流下限电压定得很低，例如，富士 G11S 系列变频器的直流下限电压为 400V，相当于电源电压的有效值为 283V，只有额定电压（380V）的 74%；ABB 公司的 ACS800 系列变频器的直流下限电压为 334V，相当于电源电压有效值为 236V，只有额定电压的 62%。

这样处理的原因大致如下：

1. 减少误动作的次数　例如，对于上面提到的电网电压因受干扰而产生的瞬间低电压，降低了直流下限电压后，可以减少检测电路捕捉到的机率。此外，对于由于网络内大电动机起动形成的电压下降，也可以减少跳闸的机率。

2. 变频器具有自动调整输出电压的功能　现代变频器都具有自动电压调整（AVR）功能，在额定频率以下运行时，如果由于电源电压下降，导致输出电压过低时，可以在一定范围内自动地调整变频器的输出电压。

9.4　变频器跳闸后的重合闸功能

问题 22　怎样使变频器的保护系统误动作时不停止工作?

近年来，由于电力电子技术的飞速发展，大功率电子设备的应用越来越普及，网络电压的波形常常因受到干扰而发生不规则的畸变，使变频器的保护系统发生误动作。此外，变频器本身的控制系统十分复杂，运行过程中发生误动作的情况也时有发生。

针对上述所发生的误动作，变频器采取的对策是设置了“重合闸”功能。

如图 9-16 所示，当变频器因故障而跳闸（误动作）时，变频器的逆变管被迅速封锁，变频器停止输出，电动机处于自由制动状态。

用户在预置重合闸功能时，可以预置每两次合闸之间的间隔时间 t_{SP}，如图 a 所示。这样，当变频器跳闸（误动作）后，经过间隔时间 t_{SP}，将自动重新合闸。

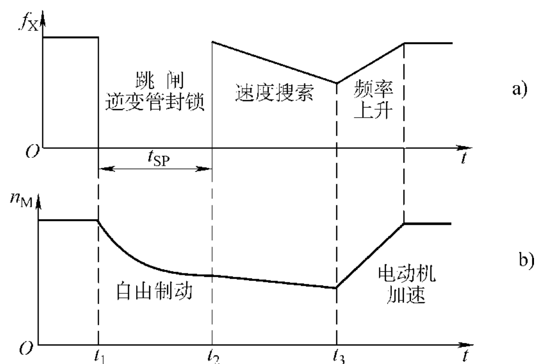


图 9-16　重合闸功能

a）变频器的工作情况　b）电动机的转速

重新合闸时，变频器的输出频率可以从 0Hz 开始上升；也可以进行自动搜索。自动搜索的过程大致是：变频器将输出频率恢复至跳闸前的频率，检测电流大小，如电流超过限值，则降低频率再试，直至电流大小在正常范围内以后，再将频率上升至跳闸前的状态，如图 b 所示。

问题23　多台变频器相互干扰怎么办?

如果变频器的容量较大，变频器的台数又不多时，应在每台变频器前配置交流电抗器;

如果变频器的容量不大，但台数很多，配置交流电抗器非但费钱，并且费工时，可考虑对每台变频器预置重合闸功能。在预置重合闸功能时，注意以下几点:

（1）时间间隔尽量短一些;

（2）有的变频器具有跳闸后仍按减速时间停机的功能，则选择此功能有效;

（3）减速时间尽量长一些。

总之，中心思想是在重新合闸时，使电动机的转速尽量地下降得少一些。

问题24　车间内的大功率电动机起动时使变频器跳闸，怎么办?

这实际上也是一种误动作。一般说来，预置了变频器的重合闸功能后，就可以避免变频器停止工作了。

由于大功率电动机起动电流的峰值可能持续若干个周期，所以，在预置重合闸的间隔时间 t_{SP}时，应适当长一些，如 $t_{SP} \geqslant 100ms$。

问题25　电网短路或遇雷击时，电源电压突降，约100ms左右接触器未释放，但变频器却跳闸了，影响了生产，怎样解决?

可供考虑的解决方法有:

1. 预置重合闸功能　多数变频器都具有瞬时停电后的自动重合闸功能，说明如下:

（1）允许重合闸的前提　如“问题15”中所述，电源停电后，控制系统的电压能够维持的时间较长。只要控制系统的电压并未衰减到下限值以下，电源恢复时，都可以重合闸。

因此，在预置瞬时停电后的重合闸功能时，很重要的一个数据便是，变频器允许停电的时间 t_0，如图9-17a所示。

（2）重合闸的处理　和上述跳闸误动作时的处理方式基本相同，如图9-17b和图c所示。

但在瞬时停电期间，变频器因为失去了电源，所以是不可能按减速时间停机的，电动机只能处于自由制动状态。

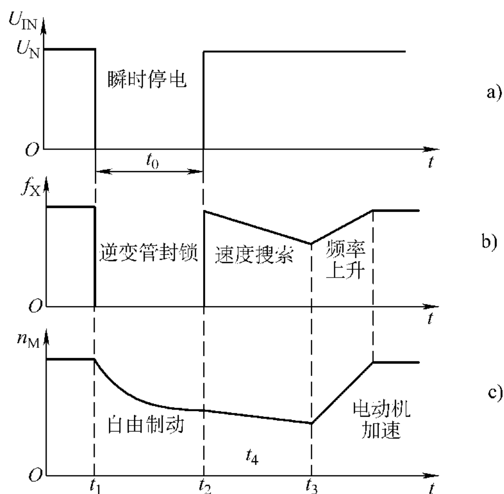


图 9-17　瞬时停电后的自动重合闸

a）电源电压　b）输出频率　c）电动机转速

2. 在变频器的输入侧串联交流电抗器　交流电抗器除了能改善功率因数外，还可以缓解电源电压的突然变化。

9.5　其他保护

问题 26　变频器因“过热”跳闸的可能原因有哪些？

一般说来，可能的原因有以下几种：

1. 环境温度过高　注意检查环境温度，不要超过变频器说明书的规定。

2. 变频器通风不良　这需要从两个方面进行检查：

（1）变频器本身的风道是否被阻塞；

（2）控制柜的风道是否被阻塞。

3. 风扇故障　变频器中的风扇寿命较短，应经常检查。

4. 模块的散热板堵塞　模块散热板上的“散热槽”有可能被灰尘堵塞，影响散热效果，应注意清理。

5. 温度检测故障　当变频器显示的温度与实际温度不相吻合时，说明温度检测电路发生了故障，应进行修理或更换。

问题 27　变频器主要有哪些薄弱环节？

除了上述的风扇以外，寿命较短的便是是电解电容器了。对于电解电容器，须注意以下两点：

1. 电解电容器的寿命和周围温度有关　如图 9-18 所示，周围温度越高，使用寿命越短。

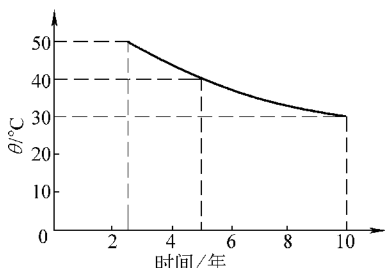


图 9-18　电容器的寿命和周围温度

2. 电解电容器不宜长期不用　电解电容器如果长时间不用，将因内部的化学反应而被腐蚀。所以，变频器买来后，如果必须长时间存放时，每年都应该定期地通电一定的时间。

问题 28　变频调速系统中低压断路器跳闸是什么原因？

1. 大容量变频器　低压断路器跳闸的主要原因是短路，如图 9-19 所示。变频器的输入侧或输出侧发生短路，或者内部逆变管直通，都可能使空气断路器跳闸。

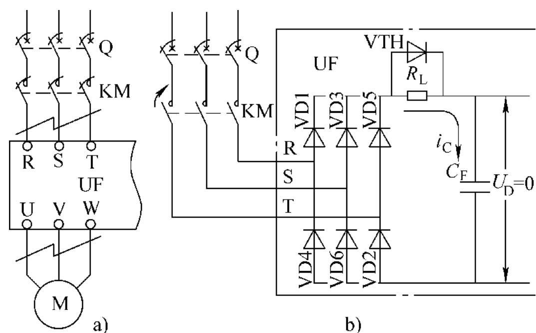


图 9-19　空气断路器的跳闸原因

a）输入、输出侧短路　b）接通电源时充电

2. 小容量变频器　除了短路之外，还有在接通电源时的充电电流导致空气断路器跳闸。其特征是：当接触器第一次接通电源时跳闸，但在第二次或第三次接通时却不跳闸了。这是因为，第一次接通后，尽管跳闸了，但空气断路器的跳闸是需要时间的，在此时间内，滤波电容器上已经充上了相当的电荷。所以，第二次或第三次接通

时，充电电流就大为减小，可能就不跳闸了。

遇到这种情况，应将空气断路器的容量选大一些。

3. 大容量与小容量的分界　这是由变频器所选限流电阻的电阻值 R_L 来决定的。

例如，如果 $R_L = 50\Omega$，则变频器在接通电源时的最大充电电流 I_{CM} 为

$$I_{CM} = \frac{537}{50} = 10.74A$$

则 8.5kVA（配用 5.5kW 电动机）及以上的变频器都可以算是大容量的。因为，8.5kVA 变频器的额定电流是 13A，空气断路器的额定电流肯定大于 13A，大于 I_{CM}，故充电时不会跳闸。

又如，如果 $R_L = 10\Omega$，则变频器在接通电源时的最大充电电流 I_{CM} 为

$$I_{CM} = \frac{537}{10} = 53.7A$$

则 40kVA（配用 30kW 电动机）及以上的变频器才可以算是大容量的。因为，40kVA 以下变频器的额定电流都小于 53.7A，如果空气断路器的额定电流小于 I_{CM}，则接通电源时就有可能跳闸。

9.6　变频调速系统的机械振动

问题 29　怎样判断是否发生了机械谐振？

1. 机械谐振的含义

（1）任何机械在运转过程中，都会发生振动的。转速不同，振动的频率也各异。

（2）任何固体和由多个固体件组成的机械，都存在着一个固有振荡频率。

当机械在运行中的振动频率和它的固有振荡频率相等或接近时，便发生机械谐振。

2. 机械谐振的主要特点　只在某一转速下发生振动，并且振动有越来越强烈的趋势，则说明在该转速下发生了机械谐振。

3. 消除机械谐振的方法

（1）检查所有的机械紧固件，如有松动者，应进行紧固。这样，

就改变了机械的固有振荡频率，也就破坏了发生谐振的条件。

（2）如果所有的机械紧固件并无松动的现象，则变频器预置“回避频率”，把发生谐振的转速回避开（跳过去）。

问题 30　产生机械振动的可能原因有哪些？

除了机械本身的原因以外，就变频器的原因而言，大致如下：

1. 电动机和变频器之间的距离较远　由于变频器输出电压的载波频率较高，当距离较远时，导线的分布电容和分布电感的影响显著增加，有可能导致电动机发生振动。

针对这种情况，可在变频器的输出电路内接入一个输出电抗器，可削弱或消除振动。

2. 电动机的参数预置不当　采用矢量控制时，必须准确预置电动机的各项参数，并准确进行电动机参数的自测定。如果参数测定不准确，容易发生振动，应重新进行自测定，并检查其他参数是否预置正确？

3. 无反馈矢量控制的工作频率太低　部分变频器在采用无反馈矢量控制方式时，当工作频率低于 6Hz 时，因运行不够稳定而发生振动。

针对这种情况，应设法提高最低工作频率。

4. 变频器的三相输出电压不平衡　当电动机的三相电压不平衡时，定子绕组所产生的旋转磁场在旋转过程中，其磁场强度将发生变化，成为“椭圆旋转磁场”，故电动机在旋转过程中，容易因转矩不均衡而发生振动。

对于这种情况，原因常常在于主控板和 IGBT 的驱动模块，用户一般难以自行解决。

9.7　变频器的维修

问题 31　怎样判断整流模块的好坏？

整流模块由六个二极管构成，测量时，只需记住整流桥各个端子的符号就可以了，如图 9-20a 所示。

以检查二极管 VD1 为例，由图 a 知，VD1 在变频器的输入端子 R 与内部直流电路的 P + 之间。并且 R 为二极管的正端，P + 为二极管的负端。

用普通的万用表即可判断，正常情况下：当黑表笔（万用表内部电池的“+”端）接 R 端，红表笔（万用表内部电池的“-”端）接 P+端时，二极管处于导通状态，如图 b 所示；交换黑表笔与红表笔，则二极管处于截止状态。

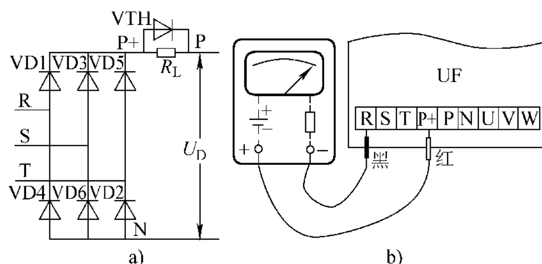


图 9-20　整流模块的检查

a）整流电路　b）测量方法

问题 32　怎样判断 IGBT 管是否正常？

用万用表只能粗略地判断 IGBT 管是否已经损坏。

如图 9-21a，将万用表的黑表笔接至 IGBT 的发射极（E 极），红表笔接至 IGBT 的控制极（G 极），使 G—E 之间得到反向电压。这时，IGBT 的集电极（C 极）与发射极（E 极）之间应该是截止的。

反之，如图 9-21b，将万用表的黑表笔接至 IGBT 的 G 极，红表笔接至 IGBT 的 E 极，使 G—E 之间得到正向电压。这时，IGBT 的集电极（C 极）与发射极（E 极）之间应该是导通的。

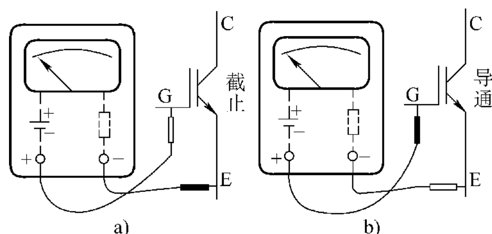


图 9-21　IGBT 管的粗测

a）IGBT 的截止　b）IGBT 的导通

问题 33　怎样判断逆变模块是否正常？

逆变模块除了有六个 IGBT 外，还有六个反并联的二极管，其测

量方法与整流桥完全相同，如图 9-22 所示。举例说明如下：

以检查 VD12 为例，由图 a 知，二极管 VD12 在逆变电路中，接在端子 N 与输出端子 V 之间。N 为二极管的正端，V 为二极管的负端。

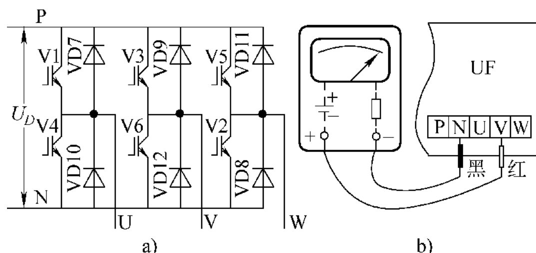


图 9-22　逆变桥反并联二极管的检查

a）逆变模块的电路　b）测量方法

在正常情况下：当黑表笔（万用表内部电池的“+”端）接 N 端，红表笔（万用表内部电池的“-”端）接 V 端时，二极管处于导通状态；交换黑表笔与红表笔，则二极管处于截止状态。

问题 34　滤波电路中的均压电阻为什么会烧坏？

均压电阻烧坏的原因主要有：

1. 均压电阻的容量不够大　如果在选择均压电阻时，其容量没有留有足够大的余量，则当直流电压偏高时，容易烧坏。

2. 滤波电容器损坏　如图 9-23，如果在串联着的两组电容器组中，有一个电容器损坏，则两个电容器组的总容量将不相等。图中，假设 C_1 中损坏了一个电容器，则 C_1 总电容量将小于 C_2 的总电容量：

$$C_1 < C_2$$

于是，两个均压电阻上的充电电流也就有了较大的差异：

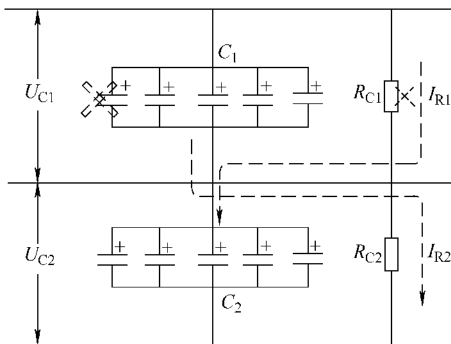


图 9-23　均压电阻烧坏的原因

$$I_{R1} > I_{R2}$$

式中　I_{R1}——C_2 的充电电流（流经 R_{C1}）（A）；

I_{R2}——C_1 的充电电流（流经 R_{C2}）（A）。

显然，电阻 R_{C1} 较容易烧坏。

问题 35　变频器面板操作正常，但外接控制不工作，是什么原因?

十分明显的是，变频器的外接输入端子电路发生了故障。检查方法大致如下：

首先，用万用表测量接线端子上的电压，如图 9-24 所示。

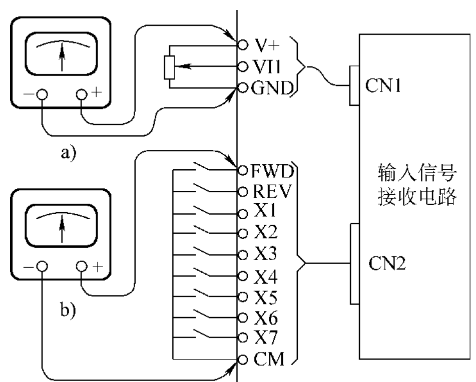


图 9-24　输入控制端的检查

万用表（图 a）测量变频器输出到外接给定电路的电压，首先测量图 9-24 中之 V + 与 GND 之间的电压，多数变频器为 10V，也有 5V 的。如电压为 0，则变频器内部的开关电源不正常。其次测量 VI1 与 GND 之间的电压，它应该随电位器滑动端子的变动而变动。如电压为 0，则电位器已损坏。

万用表（图 b）测量输入控制电路的电压。

如果 V + 与 GND 之间的电压正常，而输入端子与 CM 之间的电压电压为 0V，则须打开盖子，把接插件 CN1 或 CN2 脱开，检查是内部电源不正常，还是接插件接触不良，或连接线与接插件之间接触不良。

9.8 变频器修复后的通电

问题 36 变频器修复后通电时，如何防止因短路而损坏器件？

1. 方法 如图 9-25b 所示，在 P_1 和 P_2 之间接入一个 40W、220V 的灯泡 HL 和一个 50W、1500Ω 的降压电阻 R_0。

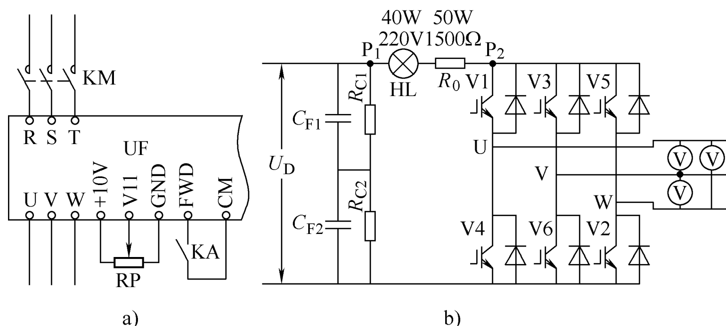


图 9-25 变频器通电时的防短路

a）外部控制电路 b）内部主电路

2. 通电步骤

（1）令接触器 KM 闭合，变频器接通电源。这时，直流回路开始有电压，但逆变桥尚未工作，变频器无输出，灯泡 HL 不亮。

（2）令继电器 KA 也闭合时，逆变桥开始工作，变频器有输出，如果三相输出电压是平衡的，说明变频器是正常的。但因为变频器未接电动机，无输出电流，故灯泡 HL 仍不亮。

3. 异常现象

（1）如果 KM 闭合后，灯丝微微发红，则说明逆变桥的漏电流太大，应逐个检查，找出漏电流大的 IGBT 管，并更换之。

（2）如果 KM 闭合后，灯泡很亮，说明逆变桥短路，必须查找原因。

问题 37 如果有一个 IGBT 因损坏而短路，如何找出？

仍按图 9-25 接线，当某个桥臂中的一个 IGBT 管短路时，现象如下：

KM 闭合，变频器通电后，并无异常；

电位器 RP 置于 0 位，将 KA 闭合，逆变桥未工作时，仍不见异常；

当 RP 略调大时，灯泡将闪烁。这是因为，逆变管已经开始工作，如图 9-26b 所示，如 V5 短路，而 V2 已经按 SPWM 的规律工作，故灯泡闪烁。当给定频率很低时，因为变频器的输出电压也很低，脉冲的占空比很小，闪烁较显著，给定频率越大，脉冲的占空比也越大，由于灯丝热惯性的原因，闪烁效果也越差。

图 9-26　有一个逆变管短路
a）外部控制电路　b）灯泡闪烁原因

问题 38　如果三相输出电压不平衡，是什么原因?

以图 9-27 电路为例，如果 KM 闭合，变频器无输出，灯泡不亮；

图 9-27　有一个逆变管开路
a）外部控制电路　b）输出电压不平衡

KA闭合，频率给定不为0，逆变桥开始工作，灯泡仍不亮，且三相输出电压不平衡。这说明，逆变管中至少有一个不正常，或已经“烧断”，或因驱动电压太低，未能饱和导通，必须逐个检查。

问题39　开关电源常见的故障有哪些?

常见故障如下：

1. 振荡心片不起振　如图9-28中之“A手”所示，其现象是：显示屏无显示，开关电源的各处电压均为0V。

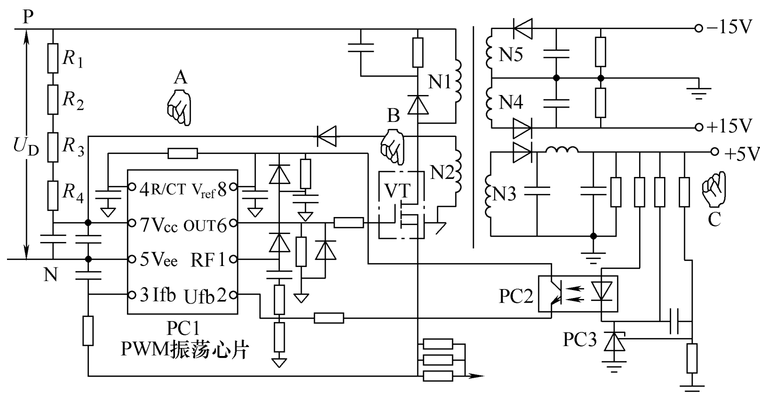


图9-28　开关电源常见故障

2. 开关管老化　如图中之“B手”所示，主要现象有：

（1）各二次绕组的带负载能力下降；

（2）运行中不规律地停机，显示屏无“故障原因”显示。

3. CPU的5V电压偏低　如图中之“C手”所示，主要现象有：

（1）变频器一通电就停机；

（2）在起动或停机过程中无规律地跳闸，常常显示“电动机过载”。

9.9　变频调速系统的特性试验

问题40　电动机的特性试验需要哪些设备?

电力拖动系统的根本任务是拖动生产机械旋转。因此，最主要的设备，就是需要有一台能够方便地调节转矩的负载。这里介绍两种比较理想的装置：

1. 磁粉制动器　磁粉制动器的结构和第七章中所述的磁粉离合器相同，只是没有输出轴。依靠磁粉间的吸引力而产生阻转矩。调节励磁电流，就可以十分方便地调节阻转矩的大小，如图 9-29a 所示。

2. 两台电动机对拖　如图 b 所示，把两台电动机的输出轴对接起来，M1 是被试验电动机，M2 作为负载，两台电动机都由变频器控制。其中，变频器 UF2 必须采用“有反馈矢量控制”方式，并且预置为“转矩控制”模式。就是说，调节给定电位器，就可以调节电动机轴上的转矩，也就调节了 M1 的负载转矩。这种方式在一些生产变频器的厂家常用。

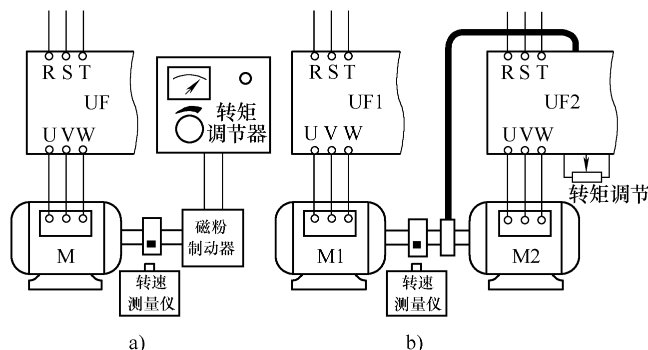


图 9-29　变频调速系统的特性试验

a）用磁粉制动器作负载　b）两台电动机对拖

问题 41　怎样得到变频调速系统的机械特性？

这里采用磁粉制动器为负载，如图 9-30a 所示。试验方法如下：

将变频器的输出频率调节到所需要的位置，理想空载转速 n_{0X} 应通过公式算出：

$$n_{0X}=\frac{60f_X}{p}$$

式中　n_{0X}——在试验频率下的理想空载转速，即同步转速（r/min）；

f_X——试验频率（Hz）；

p——磁极对数。

调节磁粉制动器阻转矩的大小，从小到大，测量在不同阻转矩时的转速，就可以得到机械特性了，如图 b 所示。

严格地说，应该作出多条在不同频率下的机械特性曲线。实际上，往往只作最高频、最低频和中间频率时的三根曲线就可以了。

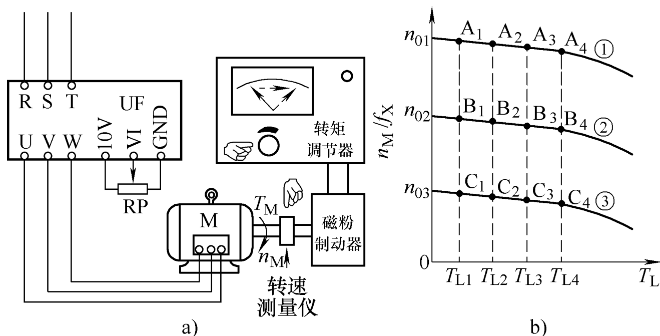


图 9-30　变频调速系统的机械特性试验

a）用磁粉制动器作负载　b）机械特性曲线

问题 42　怎样得到负载变化时的电流曲线？

本试验的目的是观察磁路饱和对电流的影响。为此试验时，应将转矩提升预置到最大（10%），如图 9-31b 所示。

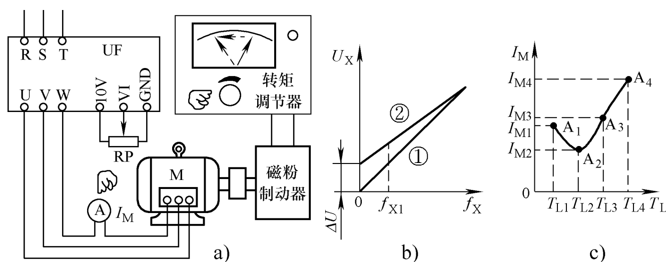


图 9-31　负载变化时的电流曲线

a）试验方法　b）转矩提升　c）电流曲线

和作机械特性时相反，试验开始时，应把负载转矩调节得大一些，使电动机的电流达到额定值。然后逐渐减小负载转矩，如图 a 所示。最后得到的电流曲线如图 c 所示。由图知，当逐渐减小负载转矩时，电流也将随之减小。但当负载转矩很轻时，电流非但不减小，反而又增大了。这是因为，当负荷很轻时，电动机的磁路进入饱和状态，励磁电流发生了畸变。

问题 43　怎样得到电流-电压曲线?

1. 负载转矩　如图 9-32a，把负载转矩预置到中间偏大的位置（约 60% T_{LN}）。

2. 试验频率　变频器的频率调节在额定频率的（5～10）% 左右。

3. 试验方法　通过改变转矩提升量来调节变频器的输出电压，如图 b 所示。读取变频器的输出电压和输出电流，得到电动机的电流和电压之间的关系曲线，如图 c 所示。由此可以找到最佳工作点，如图中之 A_2 所示。

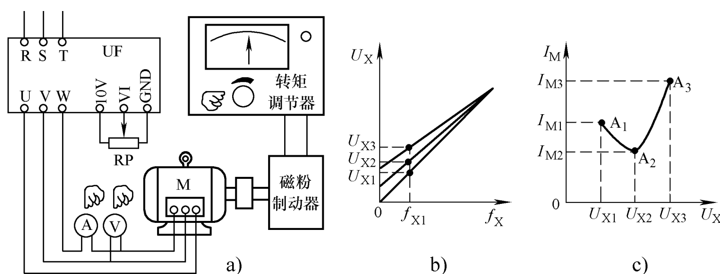


图 9-32　电流-电压曲线

a）试验方法　b）转矩提升　c）电流-电压曲线

第 10 章　异步电动机的基本原理

10.1　异步电动机的结构与旋转原理

问题 1　变频调速技术为什么主要应用于异步电动机?

这是因为在所有电动机中，由于三相交流异步电动机转子绕组由两侧端部互相短接的铜条或铝条（俗称鼠笼条）构成，和外电路之间没有任何电的联系，可自成一体，象个“鼠笼”，如图 10-1b 所示。这种结构在简单、坚固方面是首屈一指的。这带来了使用寿命长、易于维修、以及价格低廉等极为突出的优点，使它在整个电力拖动领域独占鳌头。在 20 世纪 80 年代以前，约占工农业生产机械中电动机总量的 85% 以上。

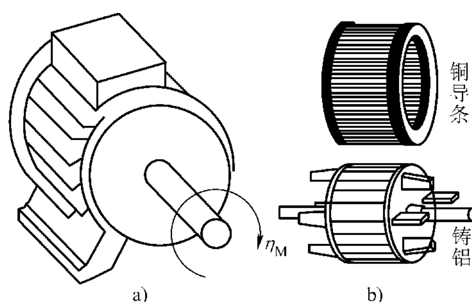


图 10-1　异步电动机及其转子

a）异步电动机外形　b）笼型转子

所以，变频调速技术只有以三相交流异步电动机为主要对象，才能得到最广泛的应用。

问题 2　什么是旋转磁场？用什么方法可以得到旋转磁场?

如果有一对磁极在空间旋转，则它所产生的磁场便是旋转磁场，如图 10-2 所示。

如果这种磁极是由直流电流进行励磁的话，可以称之为直流旋转磁场。

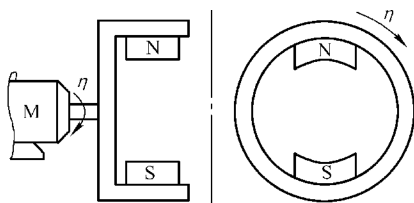


图 10-2　直流旋转磁场

大体上说，产生旋转磁场的方法有两大类：

（1）用机械的方法产生。如上述的直流旋转磁场，它

必须用一台电动机来带动它，方能旋转起来；

（2）多相交变电流流入多相绕组后所产生的合成磁场，也是旋转磁场。

问题 3　三相交流异步电动机内的旋转磁场是怎样产生的?

1. 二极旋转磁场　三相交流异步电动机的定子铁心里，安放了三个在空间互差 2π/3 的绕组 AX、BY 和 CZ，称为三相绕组，如图 10-3a 所示。

三相绕组中分别通入相位上互差 2π/3 的三相交变电流 i_A、i_B 和 i_C，如图 10-3b 所示。

在这种情况下，其合成磁场的特点如下：

当 $t=0$ 时，$i_A=0$；i_B 为“－”，故 B 相电流从 Y（绕组的尾端）流入，B（绕组的首端）流出；i_C 为“＋”，故 C 相电流从 C（绕组的首端）流入，而从 Z（绕组的尾端）流出。

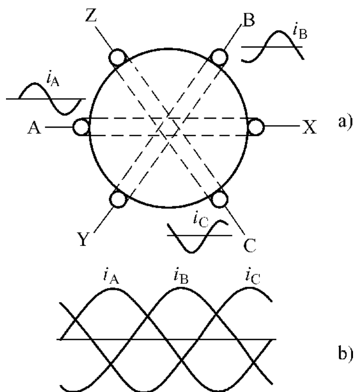


图 10-3　电动机的定子绕组
a）三相绕组　b）三相电流

各相电流产生的磁场以及三组绕组的合成磁场如图 10-4b 所示；

当 $t=5T/12$ 时，i_A 和 i_B 都为“＋”，且相等，电流分别从各绕组的首端 A 和 B 流入，而从绕组的尾端 X 和 Y 流出；i_C 为“－”，故 C 相电流从 Z 流入，而从 C 流出。

各相电流产生的磁场以及三组绕组的合成磁场如图 10-4c 所示，由图可以看出，磁场的轴线顺时针旋转了 5π/6 角。

当 $t=5T/6$ 时，$i_B=0$；i_A 为“－”，A 相电流从 X 流入，而从 A 流出；i_C 为“＋”，C 相电流从 C 流入，而从 Z 流出。

各相电流产生的磁场以及三组绕组的合成磁场如图 10-4d 所示，与 $t=0$ 时相比，磁场的轴线顺时针旋转了 5π/3 角。

显然，当电流交变一个周期（$t=T$）时，合成磁场的轴线也将旋转一周。

当电流的频率为 f（即每秒钟交变 f 周）时，则合成磁场的轴线也旋转 f 周，其每分钟转速为 60fr/min。

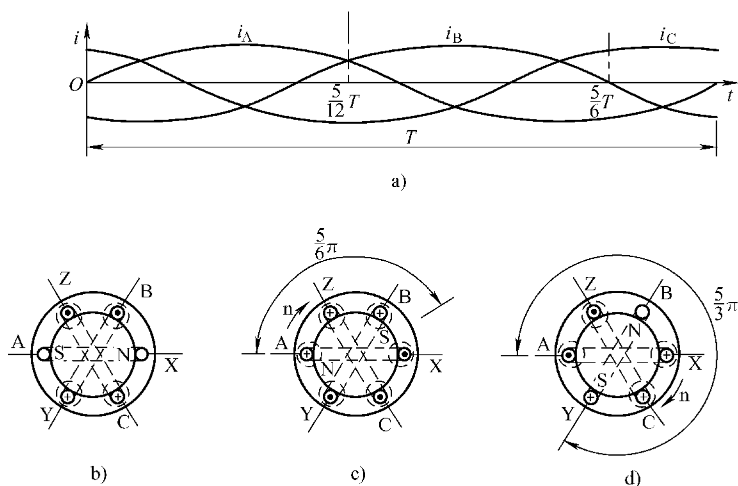


图 10-4　三相交变电流的合成磁场

a）三相电流　b）$t=0$ 时的磁场

c）$t=5T/12$ 时的磁场　d）$t=5T/6$ 时的磁场

2. 四极旋转磁场　如果在电动机的定子铁心里，放置两组三相绕组，分别是 a_1—x_1、b_1—y_1 和 c_1—z_1（第 1 组）；a_2—x_2、b_2—y_2 和 c_2—z_2（第 2 组），每组绕组在空间上只占电动机定子的一半。

两相绕组的同一相绕组之间互相串联：

A 相：x_1 和 a_2 相接，余下两端为相头 A（a_1）和相尾 X（x_2）；

B 相：y_1 和 b_2 相接，余下两端为相头 B（b_1）和相尾 Y（y_2）；

C 相：z_1 和 c_2 相接，余下两端为相头 C（c_1）和相尾 Z（z_2）。

如图 10-5 所示。磁场特点（在说明磁场特点时，绕组本身将不再画出）如图 10-6 所示。

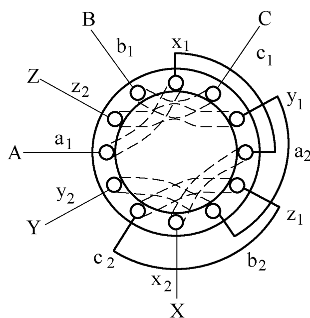


图 10-5　三相 4 极接法

当 $t=0$ 时，$i_A=0$；i_B 为“－”，故电流从 Y（绕组的尾端，也是第 2 组绕组的尾端 y_2）流入，从 b_2 流出后又进入 y_1，最后从 B（绕组的首端，也是第 1 组绕组的首端 b_1）流出；i_C

为“+”，故电流从 C（绕组的首端，也是第 1 组绕组的首端 c_1）流入，从 z_1 流出后又进入 c_2，最后从 Z（绕组的尾端，也是第 2 组绕组的尾端 z_2）流出。三相电流的合成磁场如图 b 所示，它具有两对磁极，每对磁极也只占定子空间的一半。在电机学中，把每对磁极下所对应的空间角度作为 2π 电角度。所以，在两对磁极的情况下，沿着定子旋转一周（即旋转 2π 空间角度），相当于旋转了 $2\times2\pi=4\pi$ 电角度。如果有 p 对磁极的话，则相当于旋转了 $p\times2\pi$ 电角度。

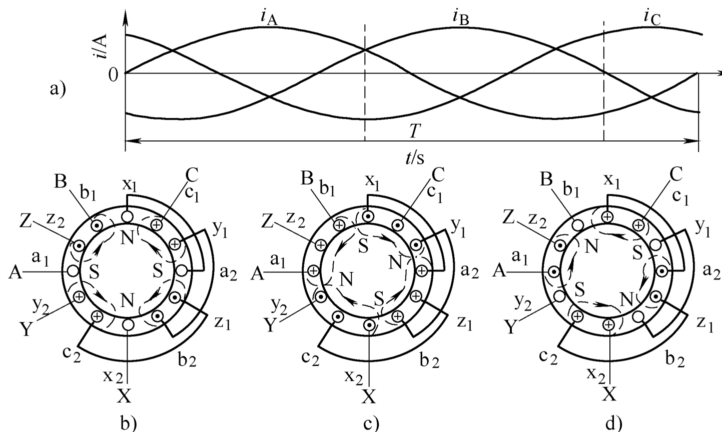


图 10-6　三相 4 极磁场

a）三相电流波形　b）$t=0$ 时的磁场　c）$t=5T/12$ 时的磁场　d）$t=5T/6$ 时的磁场

当 $t=5T/12$ 时，i_A 和 i_B 都为“+”，且相等。电流分别从绕组的首端 A 和 B 流入，而从绕组的尾端 X 和 Y 流出；i_C 为“−”，C 相电流从尾端 Z 流入，而从首端 C 流出。三相电流的合成磁场如图 c 所示，磁场的轴线顺时针旋转了 5π/6 电角度，但就空间角度而言，则只旋转了 5π/12。

当 $t=5T/6$ 时，$i_B=0$，i_A 为“−”，A 相电流从绕组的尾端 X 流入，而从绕组的首端 A 流出；i_C 为“+”，C 相电流从首端 C 流入，而从尾端 Z 流出。三相电流的合成磁场如图 d 所示，与 $t=0$ 时相比，磁场的轴线顺时针旋转了 5π/3 电角度，但就空间角度而言，则只旋转了 5π/6。

可见，当电流交变一个周期（$t=T$）时，合成磁场的轴线只旋转了半周。

当电流的频率为 f，磁极对数为 p 时，旋转磁场的每分钟转速可求出如下：

$$n_0=\frac{60f}{p} \tag{10-1}$$

式中　n_0——旋转磁场的转速，也称同步转速（r/min）；

f——交变电流的频率（Hz）；

p—磁极对数。

问题 4　两相交变电流的合成磁场也是旋转磁场吗？

是的，说明如下：

1. 二极旋转磁场　在电动机的定子铁心里，安放两个在空间互相垂直的绕组 α 和 β；

将相位上互差 π/2 的两相交变电流 i_α 和 i_β 分别通入两个绕组，i_α 和 i_β 的周期是 T，如图 10-7a 所示。则磁场特点如下：

当 $t=0$ 时，$i_\alpha=0$，i_β 为“－”，故电流从 β′（绕组的尾端）流入，而从 β（绕组的首端）流出，两者的合成磁场如图 b 所示；

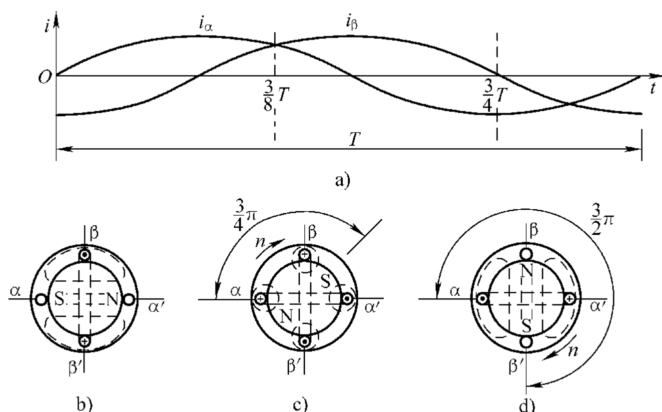


图 10-7　二相交变电流的合成磁场

a）二相电流　b）$t=0$ 时的磁场

c）$t=3T/8$ 时的磁场　d）$t=3T/4$ 时的磁场

当 $t=3T/8$ 时，i_α 和 i_β 都为“+”，且相等。各相电流分别从绕组的首端 α 和 β 流入，而从绕组的尾端 α′和 β′流出。它们的合成磁场如图 c 所示，磁场的轴线顺时针旋转了 $3\pi/4$ 角；

当 $t=3T/4$ 时，i_α 为“−”，$i_\beta=0$。α 相电流从绕组的尾端 α′流入，而从绕组的首端 α 流出。合成磁场如图 d 所示，与 $t=0$ 时相比，磁场的轴线顺时针旋转了 $3\pi/2$ 角。

显然，当电流交变一个周期（$t=T$）时，合成磁场的轴线也将旋转一周。

当电流的频率为 f（即每秒钟交变 f 周）时，则合成磁场的轴线也旋转 f 周，其每分钟转速为 $n_0=60f\text{r/min}$。

2. 四极旋转磁场　如果在电动机的定子铁心里，放置两组两相绕组，分别是 $\alpha_1-\alpha_1'$、$\beta_1-\beta_1'$和 $\alpha_2-\alpha_2'$、$\beta_2-\beta_2'$，每组绕组在空间上只占电动机定子的一半。

两相绕组的同一相绕组之间互相串联：

α 相：α_1'和 α_2 相接，余下两端为相头 α 和相尾 α′；

β 相：β_1'和 β_2 相接，余下两端为相头 β 和相尾 β′。

如图 10-8 所示，则磁场特点如下：

为清楚起见，在说明磁场特点时，绕组本身将不再画出，如图 10-9 所示。

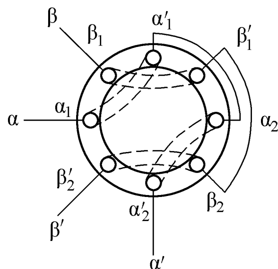


图 10-8　两相 4 极接法

当 $t=0$ 时，$i_\alpha=0$，i_β 为“−”，故电流从 β′（绕组的尾端，也是第 2 组绕组的尾端 β_2'）流入，从 β_2 流出后又进入 β_1'，最后从 β（绕组的首端，也是第 1 组绕组的首端 β_1）流出。两者的合成磁场如图 b 所示，它具有两对磁极，每对磁极只占定子空间的一半。

当 $t=3T/8$ 时，i_α 和 i_β 都为“+”，且相等。各相电流分别从绕组的首端 α 和 β 流入，而从绕组的尾端 α′和 β′流出。它们的合成磁场如图 c 所示，磁场的轴线顺时针旋转了 $3\pi/4$ 电角度，但就空间角度而言，则只旋转了 $3\pi/8$；

当 $t=3T/4$ 时，i_α 为“−”，$i_\beta=0$。α 相电流从绕组的尾端 α′流入，而从绕组的首端 α 流出。合成磁场如图 d 所示，与 $t=0$ 时相比，

磁场的轴线顺时针旋转了 3π/2 电角度，但就空间角度而言，则只旋转了 3π/4。

显然，当电流交变一个周期（$t=T$）时，合成磁场的轴线在空间只旋转了半周。

如果电流的频率为 f，即每秒钟交变 f 周，则合成磁场的轴线只旋转 $f/2$ 周。如果有 p 对磁极的话，则每分钟转速也可由式（10-1）求出。

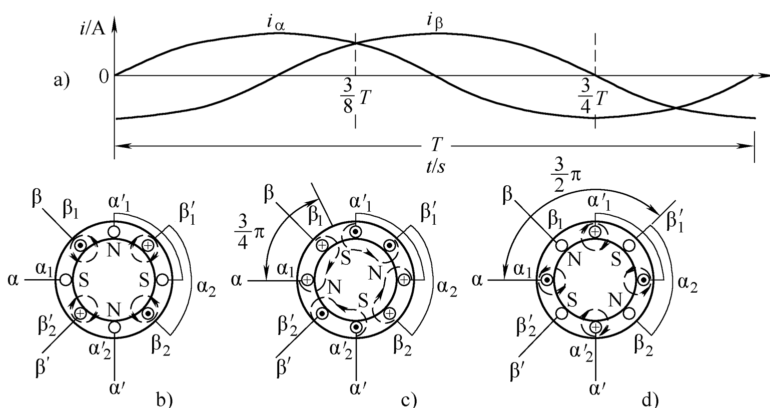


图 10-9　两相 4 极磁场

a）两相电流波形　b）$t=0$ 时的磁场　c）$t=3T/8$ 时的磁场　d）$t=3T/4$ 时的磁场

问题 5　三相旋转磁场和两相旋转磁场有什么区别？

就所产生的磁场而言，并无区别。但由于绕组结构的不同，绕组相互间的耦合情况是不同的。

三相绕组由于各相绕组在空间位置上互差 2π/3 电角度，因而任何一相电流所产生的磁通，必然要穿过另外两相绕组，在另外两相绕组中产生互感电动势，即三相绕组相互间存在着磁的耦合，如图 10-10a 所示。

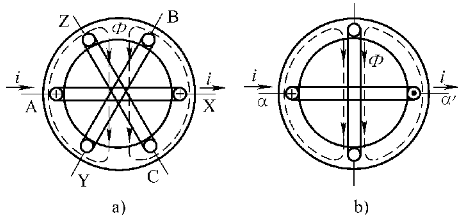


图 10-10　三相绕组与二相绕组的比较

a）三相绕组　b）二相绕组

两相绕组由于各相绕组在空间位置上互相垂直，因而任何一相电流所产生的磁通，并不穿过另外一相绕组，相互间不存在着磁的耦

合，如图 10-10b 所示。

问题 6　异步电动机是怎样把电能转换成机械能的？

三相交流异步电动机的定子中安置着三相绕组，如图 10-3 和图 10-5 所示。当把电源的三相交变电流通入三相绕组时，其输入功率为三相电功率：

$$P_1 = \sqrt{3} U_L I_1 \cos\varphi_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1 \tag{10-2}$$

式中　P_1——电动机输入的三相电功率（kW）；

U_L——电源的线电压（V）；

U_1——电源的相电压（V）；

I_1——电动机定子侧的输入电流（A）；

$\cos\varphi_1$——定子侧的功率因数。

如上述，三相电流的合成磁场是旋转磁场，转速为 n_0。旋转磁场的磁力线被转子的短路绕组切割，在短路绕组中产生感应电动势和感应电流。流过感应电流的短路绕组在定子磁场的作用下，产生电磁力，并形成电磁转矩 T_M，使转子以转速 n_M 旋转，如图 10-11 所示。转子轴上便输出机械功率：

$$P_2 = \frac{T_M n_M}{9550} \tag{10-3}$$

式中　P_2——电动机轴上输出的机械功率（kW）；

T_M——电动机的电磁转矩（N · m）；

n_M——电动机的转速（r/min）。

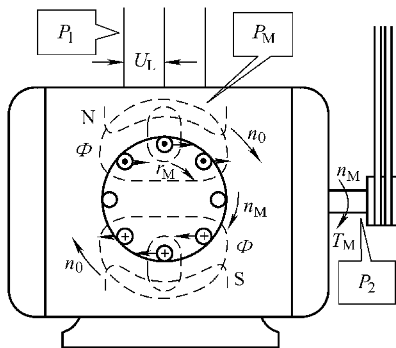


图 10-11　异步电动机的工作原理

总结上述，则异步电动机是通过电磁感应把定子输入的三相电功率转换成机械功率，从轴上输出的。所以，异步电动机也称为感应电动机。

问题7　异步电动机为什么只能异步?

由上述，如果电动机转子的转速和旋转磁场的转速相同的话，转子绕组将不再切割磁力线，也就没有了感应电动势和感应电流，从而也不可能产生电磁力和电磁转矩，转子的转速将无法维持。所以，转子的转速将永远也不可能"追"上同步转速。或者说，保持转子旋转的必要条件是转子转速和同步转速之间必须保持一定的转差：

$$\Delta n = n_0 - n_M \tag{10-4}$$

式中　Δn——电动机的转差（r/min）。

在多数情况下，用转差率来表示：

$$s = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n_0 - n_M}{n_0} \tag{10-5}$$

式中　s——转差率。

问题8　什么是主磁通和漏磁通?

1. 主磁通　在定子电流产生的磁通中，凡能够穿过空气隙与转子绕组相链的部分。所谓"与转子绕组相链"，也就是能够被转子绕组切割，使转子绕组因产生感应电动势和感应电流而得到能量。所以，主磁通是能够传递能量的部分。如图10-12中之Φ_1所示。

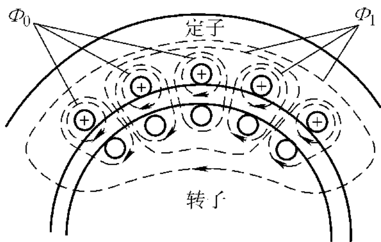


图10-12　主磁通和漏磁通

2. 漏磁通　在定子电流产生的磁通中，未能穿过空气隙与转子绕组相链，从而并不起能量传递作用的磁通，称为漏磁通，如图10-12中之Φ_0所示。

10.2　异步电动机的分析方法

问题9　异步电动机为什么要用等效电路来分析?

异步电动机在进行定量分析时，存在着两个问题：

（1）因为在定子电路和转子电路之间只有磁的联系，而没有电的联系，如图 10-13 所示。所以，两个电路的电压和电流之间的相互关系，难以简单地进行定量描述；

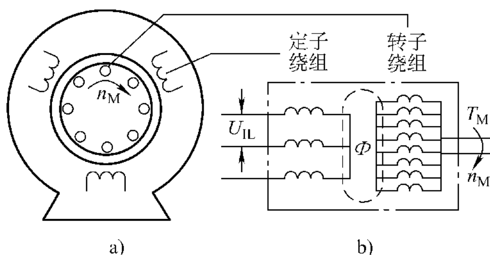


图 10-13　异步电动机的电路

a）结构示意图　b）定、转子电路

（2）转子绕组是在旋转的，其能量用于带动负载旋转，而定子绕组却是静止的。因此，存在着一个如何把旋转着的机械能定量地反映在静止电路中的问题。

要解决好上面两个问题，只有借助于等效电路。等效电路非但要把两个互不相连的电路等效地连接到一起，还要把电动机输出的机械能等效地反映到静止的电路中。

借助于等效电路，人们对异步电动机的定量分析变得简单得多了。

问题 10　定子的等效电路是怎样得出的？

1. 概述　异步电动机的定子主要由铁心和三相绕组所组成，因此属于三相电感电路。根据电工基础的知识：在电感电路中，电流的大小取决于电源电压和自感电动势之间的平衡关系。而在电动机的定子绕组中，自感电动势有以下两个特点：

（1）其表现形式由定子绕组切割自己的旋转磁场而产生。但就本质而言，仍然是自身磁通变化的结果；

（2）如上述，在电动机里，定子磁通被分成为主磁通和漏磁通两个部分，它们在传递能量方面的作用不同，所以，在等效电路里的处理方法也不一样。

2. 主磁通的自感电动势　因为定子电路由对称的三相绕组构成，所以，在分析时可以只拿一相来进行观察。

（1）自感电动势的大小　所有交变磁通都会在绕组中产生自感电动势，电动机的定子绕组切割了自己产生的主磁通而感应的自感电动势，是定子电路中和电源电压相抗衡的主要成分。或者说，电源电压主要是克服了自感电动势而作功的，因而常称为反电动势。其大小决定于：

$$e_1 = -\frac{\mathrm{d}\Phi_1}{\mathrm{d}t} = -L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} \tag{10-6}$$

式中　Φ_1——主磁通的瞬时值（Wb）；

$\frac{\mathrm{d}\Phi_1}{\mathrm{d}t}$——主磁通的变化率；

e_1——定子反电动势的瞬时值（V）；

L_1——主磁通引起的自感系数（mH）；

$\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$——定子电流的变化率（A/s）。

由式（10-6）可以推导出反电动势的有效值如下：

$$E_1 = 4.44K_E f_1 N_1 \Phi_1 \tag{10-7}$$

式中　E_1——反电动势的有效值（V）；

K_E——比例常数；

f_1——定子电流的频率（Hz）；

N_1——每相定子绕组的匝数。

式（10-7）的物理意义如图 10-14 所示：

比较图 a 和图 b 知：频率 f_1 增大，则磁通 Φ_1 的变化率也增大，反电动势 e_1 的振幅值和有效值随之增大；

比较图 a 和图 c 知：在频率相等的情况下，磁通 Φ_1 的振幅增大，其变化率必增大，反电动势 e_1 的振幅值和有效值也随之增大。

（2）反电动势的意义　式（10-7）还表明：在频率 f_1 一定的情况下，反电动势的有效值 E_1 和主磁通 Φ_1 成正比。因此，反电动势的大小直接反应了主磁通的大小，也反应了向转子传递能量的大小。

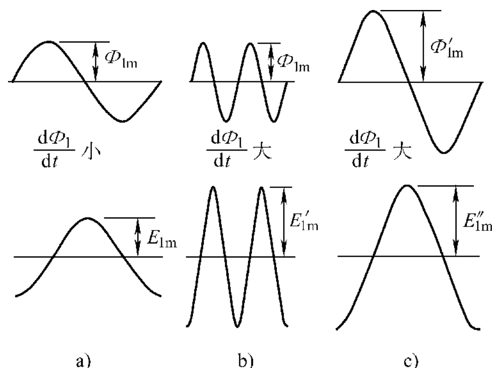


图 10-14　式（10-7）的物理意义

a）一般情况　b）频率高　c）振幅大

3. 漏磁通的自感电动势　定子绕组切割漏磁通所产生的自感电动势，由下式决定：

$$e_{01} = -\frac{d\Phi_0}{dt} = -L_{01}\frac{di_1}{dt} \tag{10-8}$$

式中　Φ_0——漏磁通的瞬时值（Wb）；

e_{01}——定子漏磁电动势的瞬时值（V）；

L_{01}——定子漏磁通引起的自感系数（mH）。

定子漏磁电动势 e_{01} 的有效值在数值上等于：

$$E_{01} = I_1 X_1 \tag{10-9}$$

式中　E_{01}——定子漏磁电动势的有效值（V）；

I_1——定子的相电流（A）；

X_1——定子绕组的漏磁电抗（Ω）。其大小决定于：

$$X_1 = 2\pi f_1 L_{01} \tag{10-10}$$

就是说，漏磁通引起的自感电动势通常是以漏磁电抗的方式来表达的。

4. 定子等效电路与电动势平衡方程

（1）定子等效电路　综合上述，可以作出一相定子绕组的等效电路，如图 10-15 所示。

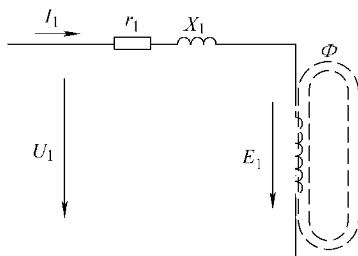


图 10-15　定子绕组的等效电路

图中　U_1——电源的相电压（V）；

r_1——定子每相绕组的电阻（Ω）；

X_1——定子每相绕组的漏磁电抗（Ω）；

E_1——定子每相绕组的反电动势（V）。

（2）电动势平衡方程　在定子电路中，电压 U_1 是从电源输入电能的标志；电流 I_1 是电能作功的标志；电能在作功过程中要克服的主要反作用是反电动势 E_1。借助等效电路，可以得到定子每相绕组的电动势平衡方程：

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + \mathrm{j}\,\dot{I}_1 X_1 \tag{10-11}$$

式中，电压、电动势和电流都用复数，说明它们之间并非代数加减的关系。

由式（10-11）知，定子电流可计算如下：

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1 + \dot{E}_1}{r_1 + \mathrm{j}X_1} \tag{10-12}$$

问题 11　怎样从定子侧看能量的传递关系？

定子侧的能量传递关系如图 10-16 所示，说明如下：

1. 输入功率　定子的输入功率就是从电源吸取的功率，其计算公式如式（10-2）：

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1$$

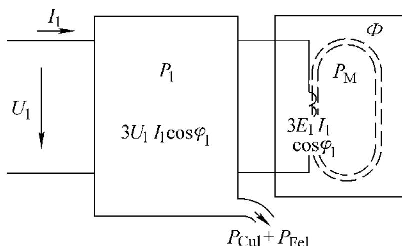


图 10-16　定子的能量关系

2. 损失功率　主要有：

（1）定子铁损耗　用 P_{Fe1} 表示，包括定子铁心中的涡流损失和磁滞损失；

（2）定子铜损耗　用 P_{Cu1} 表示，就是定子绕组的电阻所消耗的功率：

$$P_{Cu1} = 3I_1^2 r_1 \tag{10-13}$$

3. 电磁功率　输入功率中减去损失功率后余下的功率，就是通过主磁通传递到转子去的功率，称为电磁功率，用 P_M 表示。计算公式如下：

$$P_{M1} = 3E_1 I_1 \cos\varphi_1 \tag{10-14}$$

式中　P_{M1}——定子侧传递给转子的电磁功率，kW。

由式（10-7）：

$$E_1 = K_E' f_1 \Phi_1 \qquad (10\text{-}15)$$

式中　K_E'——常数，$K_E' = 4.44K_E N_1$。

式（10-14）表明，传递到转子去的电磁功率中，有两个十分重要的方面：

（1）电流大小　众所周知，电动机中，电流的大小是和负载轻重密切相关的。所以说，电磁功率的大小是根据负载的轻重而随时调整的。

（2）反电动势　反电动势 E_1 的大小直接表示了交变磁场传递功率的能力。它既和主磁通 Φ_1 的大小成正比，又和频率 f_1 成正比。这是交变电磁场传递能量的一个重要规律。十分明显的是，如果频率等于 0Hz（即直流电）的话，就不可能产生旋转磁场，也就不可能把能量传递到转子中去。

问题 12　怎样把旋转着的转子电路等效成静止的三相电路？

1. 转子电路的等效过程　如图 10-17 所示：

（1）把转子的笼条用旋转着的多相电路来表示，如图 a 和图 b 所示。在图 b 中：

E_2—每相绕组（笼条）的感应电动势；

r_2—每相绕组的电阻；

X_2—每相绕组的漏磁电抗；

I_2—每相电流。

（2）用旋转着的等效三相电路来代替旋转的多相电路，如图 c 所示。等效的原则是：等效前后，转子的功率不变。

（3）把旋转着的三相电路又等效成静止的三相电路，如图 d 所示。图中，各参数都缀以“′”，说明它是等效值，而不是实际值。等效的原则仍然是：等效前后，转子的功率不变。这里，一个十分重要的问题，是如何在静止电路中，反映电动机轴上旋转着的机械功率。

2. 负载电阻的含义　图 d 与图 c 相比，每相都增加了一个等效的负载电阻 R_L'。它便是电动机输出的机械功率在静止电路中的反映。因此，在 R_L'上所消耗的电功率，应等于轴上的机械功率：

$$3I_2'^2 R_L' = \frac{T_M n_M}{9550} \qquad (10\text{-}16)$$

式中，I_2'——转子每相等效绕组中的电流（A）；

R_L'——机械负载在转子每相等效绕组中的等效电阻（Ω）；

T_M——电动机的电磁转矩（N·m）；

n_M——电动机的转速（r/min）。

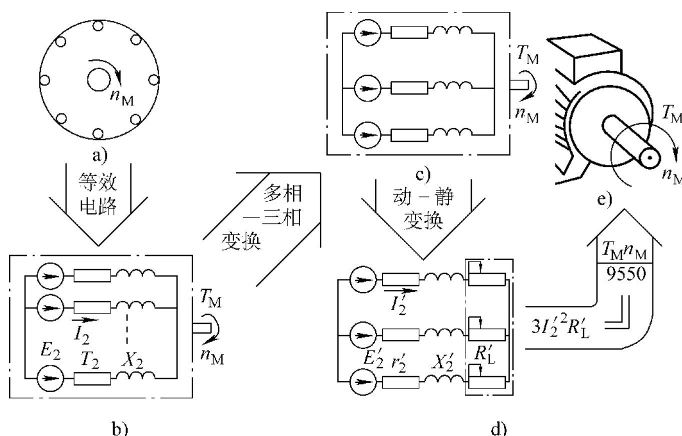


图 10-17　转子等效电路的作出

a）转子截面　b）转子等效电路　c）变换成三相电路

d）变换成静止的三相电路　e）转子轴输出机械能

3. 转子的一相等效电路　和定子相仿，转子的三相等效电路也是对称的。所以，在分析时可以只拿一相来进行观察。转子的一相等效电路如图 10-18 所示。

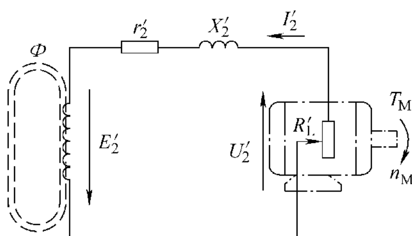


图 10-18　转子的一相等效电路

图中　E_2'——转子每相等效绕组的感应电动势；

r_2'——转子每相等效绕组的电阻（Ω）；

X_2'——转子每相等效绕组的漏磁电抗（Ω）；

U_2'——转子每相等效绕组中，机械负载等效电阻两端的电压，相当于转子绕组输出侧的端电压（V）。

4. 转子的电动势平衡方程　在转子电路中，电动势 E_2' 是从定子侧输入的功率通过磁通传递给转子，在转子中转换成电能的标志。在转子电路中，它相当于电源电动势；电流 I_2' 是电能作功的标志；电能在作功过程中除了要克服转子绕组自身的电阻和漏磁电抗外，更主要的是，要克服负载阻转矩的等效电阻 R_L'。

借助等效电路，可以得到转子每相绕组的电动势平衡方程：

$$\dot{E}_2' = -\dot{U}_2' + \dot{I}_2' r_2' + \mathrm{j}\,\dot{I}_2' X_2' \qquad (10\text{-}17)$$

转子等效电路中的所有物理量的符号旁，都缀以“′”。等效电路中的物理量和实际电路中物理量之间的换算关系，称为折算。因此，所有缀以“′”的物理量，都是“折算值”。

因为电动机输出的是机械功率，而负载转矩与转速的大小在运行过程中是有可能经常变化的。所以，R_L' 是一个可变等效电阻，其大小应能随负载的变化而变化。

问题 13　怎样从转子侧看能量关系？

转子侧的能量传递关系如图 10-19 所示，说明如下：

1. 电磁功率　就是转子绕组切割定子主磁通得到的功率，或者说，是通过磁场传递给转子的功率。是转子侧的输入功率。其计算公式如下：

$$P_{M2} = 3E_2' I_2' \cos\varphi_2 \qquad (10\text{-}18)$$

式中　P_{M2}——转子侧得到的电磁功率（kW）。

2. 损失功率

（1）转子铁损　用 P_{Fe2} 表示，包括转子铁心中的涡流损失和磁滞损失；

（2）转子铜损　用 P_{Cu2} 表示，就是转子绕组的电阻所消耗的功率：

$$P_{Cu2} = 3I_2'^2 r_2' \qquad (10\text{-}19)$$

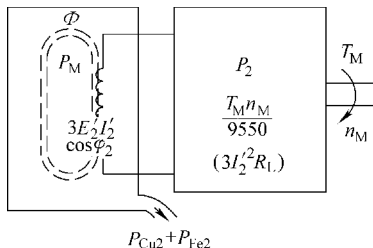


图 10-19　转子的能量关系

3. 输出功率　因为输出的是机械功率，由式（10-3）计算。在等效电路中，则表现为等效的电功率：

$$P_2 = 3U_2' I_2' = 3I_2'^2 R_L' \qquad (10\text{-}20)$$

问题 14　怎样绘出电动机的一相等效电路图?

1. 定、转子等效电路的合并　把上面的定、转子等效电路放到一起，就得到如图 10-20a 所示的等效电路。

如果在把转子绕组变换成等效三相绕组时，使每相绕组的匝数 N_2'与定子每相绕组的匝数 N_1 相等：

$$N_1 = N_2'$$

则定、转子绕组切割同一个旋转磁场所产生的感应电动机也是相等的：

$$E_1 = E_2'$$

于是，图 a 两侧的电路就可以合二为一了，如图 b 所示。中间的绕组统称为励磁绕组。

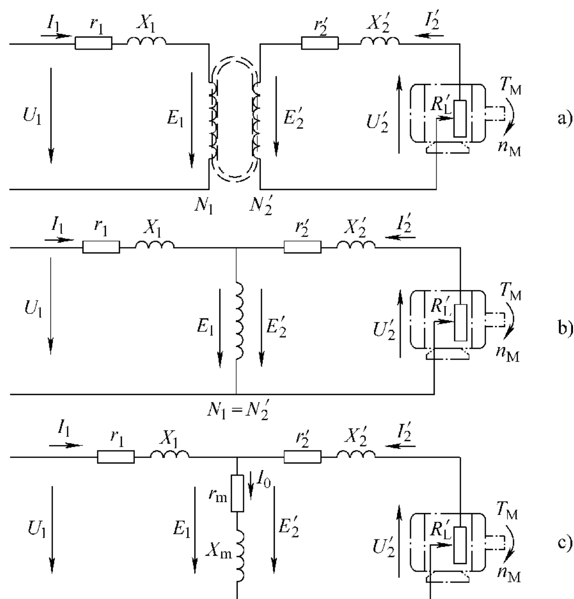


图 10-20　完整的电动机等效电路

a）磁耦合的定、转子等效电路　b）$N_1 = N_2'$时的定、转子等效电路

c）电动机等效电路的完成

2. 励磁支路　励磁绕组所在的电路称为励磁支路，由电阻 r_m 和电抗 X_m 所构成，如图 c 所示。r_m 和 X_m 的物理意义如下：

r_m 是铁损（包括涡流损失和磁滞损失）的等效电阻；

X_m 则是由主磁通引起的等效电抗。

流经励磁支路的电流称为励磁电流，用 I_0 表示。

图 10-20 是比较基本的，也是比较常见的等效电路，除此以外，根据不同的需要和考虑，异步电动机的等效电路还可以有各种不同的形式，不再赘述。

问题 15　定子电流和转子电流之间有怎样的关系？

1. 磁动势平衡方程　在异步电动机的磁路中，定子电流的磁动势 I_1N_1 是产生磁场的“源”，是输出能量的一方；磁通 Φ（通常用基波分量 Φ_1 表示）是磁场作功的标志；转子电流的磁动势 I_2N_2（或 $I_2'N_1$）则是得到能量的一方，它在得到能量的过程中，必然对输出能量的一方产生反作用。因此，磁路传递能量的工作过程，就是定子电流的磁动势 I_1N_1 在克服了转子电流磁动势 I_2N_2（或 $I_2'N_1$）的去磁效应（反作用）后产生磁通 Φ 的过程，如图 10-21 所示。其能量平衡关系由磁动势平衡方程来描述：

$$\dot{I}_1N_1 = -\dot{I}_2'N_1 + \dot{I}_0N_1 \tag{10-21}$$

式中　I_1N_1——定子电流的磁动势；

$I_2'N_1$——转子电流的磁动势；

I_0N_1——励磁磁动势。

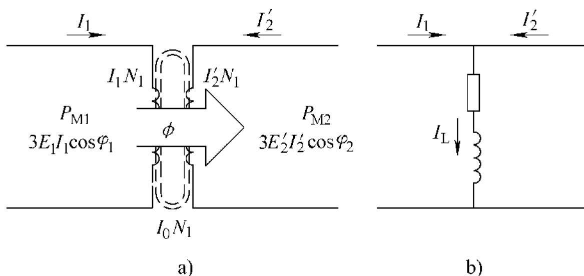


图 10-21　磁动势和电流的平衡

a）磁动势的平衡　b）电流的平衡

励磁磁动势 I_0N_1 是定子电流的磁动势 I_1N_1 和转子电流的磁动势 $I_2'N_1$ 互相平衡的结果，用于产生磁通。

2. 电流平衡方程　由于式（10-21）两边的 N_1 可以约去，故磁

动势之间的平衡关系也可以简单地通过电流平衡方程来表述：

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' + \dot{I}_0 \tag{10-22}$$

转子电流 I_2'的有效值总是和负载转矩成比例的，故常称为转矩分量；I_0 则是励磁分量，或称为励磁电流。

问题 16　怎样绘出矢量图？

1. 参考矢量　以磁通 Φ_1 为参考矢量，如图 10-22a 中之 OA。

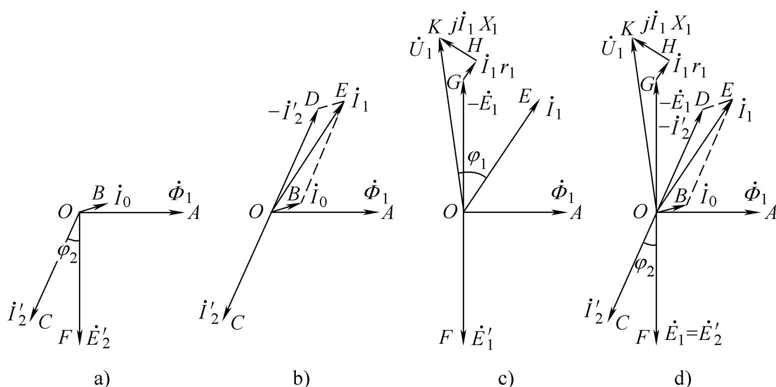


图 10-22　电动机的矢量图

a）基本量　b）电流矢量　c）电压矢量　d）总矢量图

2. 基本矢量

（1）励磁电流　因为励磁电流除了产生磁通外，还要克服涡流损失和磁滞损失，故励磁电流 I_0 比磁通略为超前，如图 a 中之 OB。

（2）转子的等效电动势　转子电动势是感应电动势，故比磁通滞后 π/2，如图 a 中之 OF。

（3）转子的等效电流　转子电流比电动势滞后 φ_2 角，如图 a 中之 OC。

3. 电流矢量　根据式（10-22），作出“$-I_2'$”，与 I_2'反向，如图 b 中之 OD。求出 $-I_2'$和 I_0 的矢量和，如图 b 中之 OE。

4. 电压矢量　由图 10-20 知，定子的反电动势 E_1 和转子的等效电动势相等，两者的矢量重合，为 OF。又根据式（10-11）：

（1）作出 $-E_1$　与 E_1 矢量反向，如图 c 中之 OG。

（2）作出电阻压降　电阻压降 I_1r_1 与电流 I_1 同相位，如图 c 中

之 GH。

（3）作出漏磁电抗压降　漏磁电抗压降 I_1X_1 比 I_1 超前 $\pi/2$，如图 c 中之 HK。

（4）作出电源相电压　连接 OK，即为定子一相绕组的相电压 U_1。

5. 总矢量图　将图 b 和图 c 叠加起来，就得到总的矢量图，如图 d 所示。

问题 17　简化等效电路是怎样得出的?

如果在图 10-23a 所示的等效电路的基础上，忽略掉定、转子的漏磁电抗和铁损，并且将转子侧的电阻合并：

$$r_2' + R_L' = \frac{r_2'}{s} \tag{10-23}$$

式中　r_2'——转子绕组的等效电阻（Ω）；

R_L'——与机械负载等效的电阻（Ω）；

s——转差率。

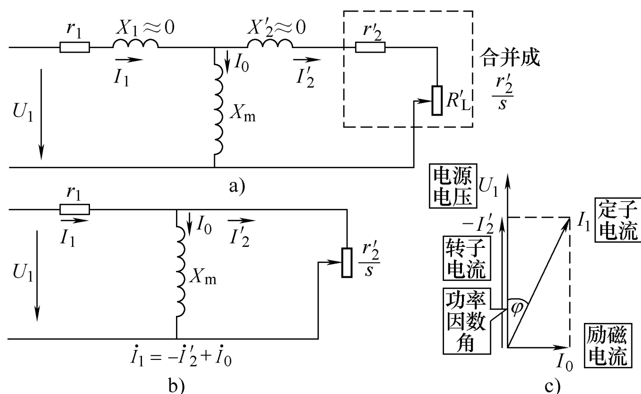


图 10-23　等效电路的简化

a）简化条件　b）简化电路　c）简化矢量图

则等效电路可简化成如图 b 所示，其特点是：

励磁电流 I_0 比电源相电压滞后 $\frac{\pi}{2}$，而转子电流的负值 $-I_2'$ 与电源相电压同相位，两者之间呈直角关系，如图 c 所示，I_1 可以粗略地计

算为

$$I_1 = \sqrt{I_2'^2 + I_0^2} \tag{10-24}$$

从而大大简化了电流之间的关系。通常，把 I_2'称为定子电流的转矩分量，而把 I_0 称为定子电流的励磁分量。

问题 18　怎样看异步电动机的能量关系?

把定子和转子的能量图综合到一起，便得到整台电动机的能量关系图，如图 10-24 所示。归纳如下：

1. 输入功率　电动机输入的是三相电功率：

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1$$

在这里，决定输入功率大小的主要因素是电源相电压 U_1 和相电流 I_1。

2. 电磁功率　从定子侧看，传输给转子的电磁功率是：

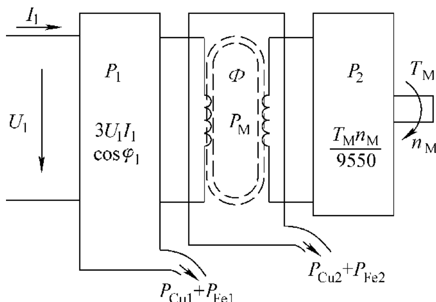


图 10-24　全电动机的能量图

$$P_{M1} = 3E_1 I_1 \cos\varphi_1$$

电磁功率的大小主要由反电动势 E_1 和相电流的有功分量 $I_1\cos\varphi_1$ 决定。

从转子侧看，转子得到的全部功率是：

$$P_{M2} = 3E_2' I_2' \cos\varphi_2$$

电磁功率的大小也决定于转子电动势 E_2'和转子电流 I_2'的有功分量 $I_2'\cos\varphi_2$。

在不计损失的情况下，上述两种方法计算的结果是相同的：

$$P_{M1} \approx P_{M2}$$

3. 输出功率　电动机输出的是轴上的机械功率：

$$P_2 = \frac{T_M n_M}{9550}$$

在等效电路中，其大小也可由下式计算：

$$P_2 = 3U_2' I_2' = 3I_2'^2 R_L' \tag{10-25}$$

上述两种计算方法的计算结果是相同的。就是说，电动机的输出功率可以从两个方面（电的和机械的）来进行计算。

问题 19　异步电动机的电磁转矩与哪些因素有关?

1. 基本因素　因为异步电动机的电磁转矩是转子电流和定子主磁通互相作用的结果，所以，电磁转矩的大小必然与转子电流与主磁通的乘积成正比：

$$T_{M} \propto I_2' \Phi_1$$

式中　Φ_1—主磁通基波分量的有效值（Wb）。

2. 电磁转矩与功率因数的关系　如图 10-25 所示，图 a 是转子电流 i_2 与电动势 e_2 同相位的波形图。图 b 是在正半周产生电磁转矩的示意图，导体外圈画出了感应电动势的方向，导体内所画，则是感应电流的方向。当转子电流与电动势同相位时，两者是相同的。在这种情况下，N 极下各导体中的电流方向，以及 S 极下各导体的电流方向都是相同的，所产生的电磁转矩将是最大的。

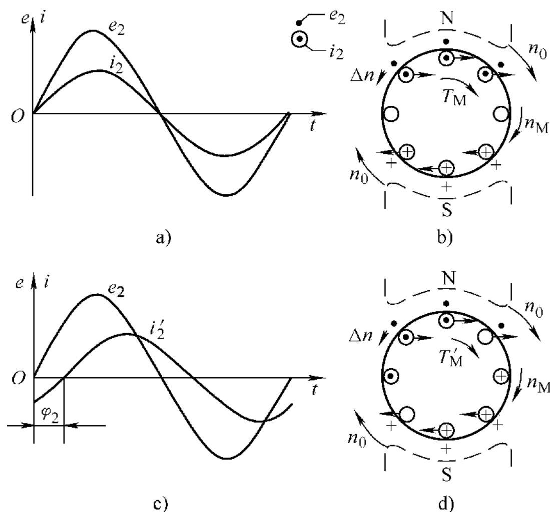


图 10-25　电磁转矩与功率因数的关系

a）转子电流与电压同相位　b）转子的电磁力

c）转子电流比电压滞后　d）转子的电磁力

当转子电流 i_2' 比电动势 e_2 滞后 φ_2 角，如图 c 所示时，转子各导体中感应电流的方向并不完全和电动势的方向相同，各磁极下导体中的电流方向也并不完全相同。因此，所产生的电磁转矩相对较小，如

图 d 所示。

3. 电磁转矩的计算公式　综合上述，电磁转矩的计算公式如下：

$$T_M = K_T I_2' \Phi_1 \cos\varphi_2 \quad (10\text{-}26)$$

式中　K_T——转矩常数。

10.3　矢量和矢量控制

问题 20　什么是空间矢量？什么是时间矢量？

1. 空间矢量　就是在空间具有具体方向的矢量。它的方向可以是固定的，也可以是旋转的。

2. 时间矢量　实际是用来表示正弦函数的旋转矢量，它并无空间方向的意义。如图 10-26a，以电流矢量为例，矢量的长度等于电流的振幅值 I_m，旋转的角速度为

$$\omega t = 2\pi f t \quad (10\text{-}27)$$

式中　t——时间（s）；

ω——角频率，与频率的关系是

$$\omega = 2\pi f \quad (10\text{-}28)$$

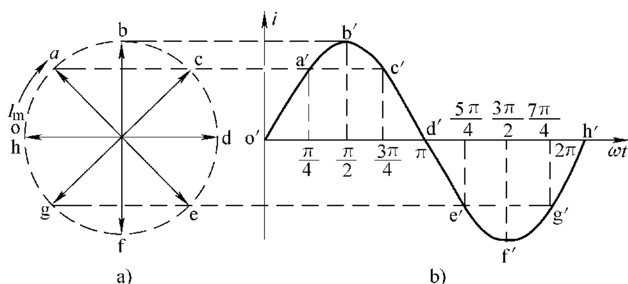


图 10-26　时间矢量

a）旋转矢量　b）旋转矢量的投影值

在 t 时刻矢量旋转的角度为 ωt，它在纵轴上的投影就等于电流的瞬时值：

$$i = I_m \sin\omega t$$

由式（10-25）知，频率相同的正弦量的旋转速度也是相同的。因此，它们的相对位置（由相位关系决定）是不变的。

所以，在分析若干个同频率正弦量之间的关系时，是没有必要旋

转的。由此作出的矢量图，就称为时间矢量。例如，图 10-27a 所示的异步电动机输入侧的电压与电流都是正弦量，它们的瞬时值曲线如图 10-27b 所示，根据各相电压和电流之间的相位关系，作出矢量图如图 10-27c 所示，毫无疑问，这是时间矢量。

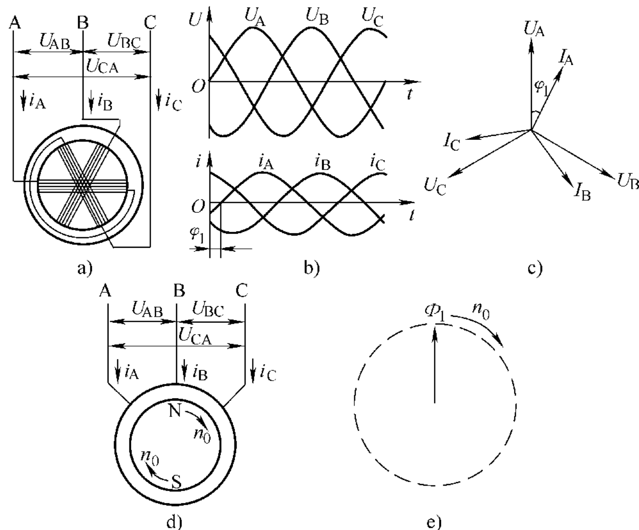


图 10-27　异步电动机中的时间矢量与空间矢量

a）电动机输入侧的电压、电流　b）电压、电流瞬时矢量图　c）时间矢量图
d）同步转速 n_0 的旋转磁场　e）三相旋转的磁通矢量

但三相电流所产生的合成磁场是以同步转速 n_0 旋转着的磁场，如图 10-27d 所示。旋转磁场的磁通如果用矢量表示，则是一个在空间旋转的矢量，如图 10-27e 所示。

用磁通矢量表示的旋转磁场是空间矢量，其方向与磁场的轴线相一致，矢量的长度等于三相的合成磁通 Φ_1（或磁感应强度 B_1），在空间按一定的速度旋转，如图 10-27e 所示。

问题 21　异步电动机有哪些空间矢量？

本来，电动机内实际存在的空间矢量只有磁通矢量。但变频调速技术发展起来以后，出于控制上的需要，其他物理量的空间矢量也衍

生了出来。说明如下：

1. 磁通矢量　有定子电流产生的磁通 $\boldsymbol{\Phi}_1$，和转子电流产生的磁通 $\boldsymbol{\Phi}_2$。两者在空间的轴线并不重合，但在负载一定的情况下，两者在空间的相对位置不变。因此，可以直接用并不旋转的空间矢量来表示，如图 10-28a 所示。通常规定，凡空间矢量，都用粗体字表示，如 $\boldsymbol{\Phi}_1$ 和 $\boldsymbol{\Phi}_2$。

如上述，磁通矢量是实际存在于电动机内的。

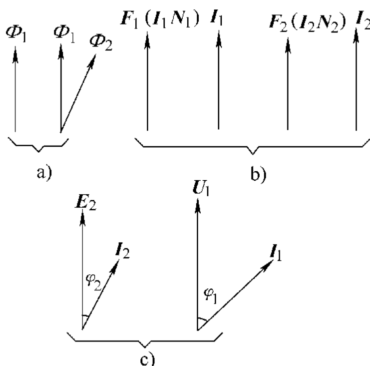


图 10-28　电动机的空间矢量

a）磁通矢量　b）磁动势和电流矢量

c）电压矢量

2. 磁动势和电流矢量　磁通是由磁动势产生的，既有了磁通矢量，就有对应的磁动势矢量 $\boldsymbol{F}_1$ 和 $\boldsymbol{F}_2$。磁动势在数值上等于电流与线圈匝数的乘积：

$$F_1 = I_1 N_1$$

$$F_2 = I_2 N_2$$

式中　F_1 和 F_2——分别是定子绕组和转子绕组的磁动势；

I_1 和 I_2——分别是定子和转子的相电流（A）；

N_1 和 N_2——分别是定子绕组和转子绕组的匝数。

线圈匝数 N_1 和 N_2 是常数，故磁动势矢量也可用电流矢量来 $\boldsymbol{I}_1$ 和 $\boldsymbol{I}_2$ 来表示，如图 10-28b 所示。(当单独画出某一物理量的空间矢量时，通常取基准方向)。

电流矢量在空间并不实际存在，但却能够代表在空间实际存在的磁动势和磁通。

3. 电动势和电压　电流是由电动势或电压产生的，既有了电流矢量，也就有对应的电压矢量。从图 10-27 可以看出，转子电动势和转子电流的分布在空间位置上是不一致的，就是说，它们的轴线在空间并不重合，两者之间的夹角便是转子的功率因数角 φ_2。同理可知，定子电压和定子电流之间的夹角是定子的功率因数角 φ_1。于是得到转子电动势矢量 $\boldsymbol{E}_2$ 和定子电压矢量 $\boldsymbol{U}_1$，如图 10-28c 所示。

电压矢量在空间并不实际存在，也不能代表实际存在的矢量。但在理论分析和控制方法上却具有着重要价值。

问题 22　不同方式产生的旋转磁场之间能够等效变换吗？

只需所产生旋转磁场的磁感应强度和转速都相同，就可以进行等效变换。但变换时，应考虑尽量地简化。例如：

两个在空间互相垂直的直流磁场（如图 10-29a 中之 M 和 T），用机械方法使之以同步转速 n_0 旋转，所产生的旋转磁场和二相旋转磁场（如图 10-29b 和 c 之间：两者都是两个互相垂直的磁场的合成（坐标系相同），只是在直流和交流之间进行变换，相对比较容易，称为“直—交变换”。

又如，二相旋转磁场和三相旋转磁场之间：两者都是多相交变磁场的合成，只是坐标系不同，变换时只需进行坐标变换就可以了，也比较容易，称为“2/3 变换”。

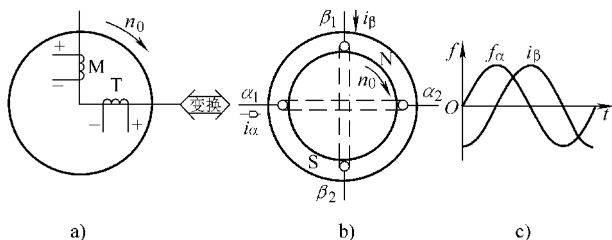


图 10-29　直流磁场和二相磁场的变换

a）直流旋转磁场　b）二相旋转磁场　c）二相电流

问题 23　异步电动机和直流电动机的主要区别在哪里？

1. 直流电动机的主要特点　直流电动机的定子是磁极，转子是电枢，如图 10-30 所示。其主要特点是：

（1）两个磁场　主磁场（磁通是 Φ_1）和电枢磁场（磁通是 Φ_A）在空间互相垂直；

（2）两个电路　励磁电路和电枢电路是互相独立的。因此，在调节转速时，可以只调节其中一个的参数，而另一个的参数则不变。

上述两个特点是直流电动机的调速性能比较优越的重要因素。

2. 异步电动机的主要特点　异步电动机则恰恰相反：

（1）异步电动机的输入量是时间矢量；

（2）励磁电流和转矩电流都包含在定子电流内，无法直接分开，且相互影响。

（3）定子磁通、转子磁通和空气隙的磁通都是旋转着的空间矢量。

所以，异步电动机要改善调速特性就比较困难。

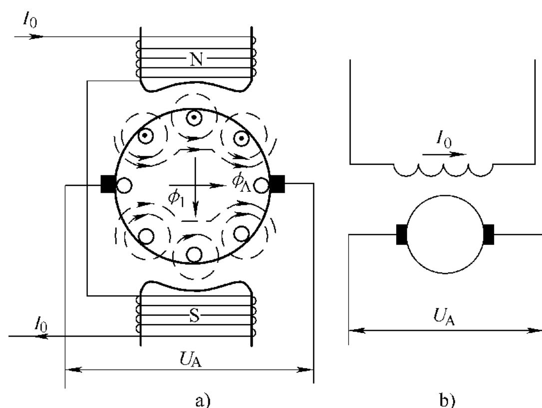


图 10-30　直流电动机的磁场和电路

a）直流电动机的磁场　b）直流电动机的电路

问题 24　什么是无反馈矢量控制？

由于矢量控制技术的核心是等效变换，而转速反馈信号并不是等效变换的必要条件。因此，出现了无反馈矢量控制方式。

所谓无反馈矢量控制，仅仅指用户不需要在变频器外部另装转速反馈装置，而并不是说，变频器内部也是开环的。

由于转速反馈需要在变频器外部附加测速装置，比较麻烦。进一步的研究表明，在了解电动机参数的前提下，即使只检测电动机的端电压和电流，也能算出转子磁通及其角速度，并进而推算出转矩电流指令 i_T^* 和励磁电流 i_M^* 指令，实现矢量控制。

无反馈矢量控制也能得到较硬的机械特性，但由于运算环节相对较多，故动态响应能力与有反馈矢量控制相比，略见逊色。

问题 25　采用了矢量控制的变频调速系统与直流电动机调速系统相比较，如何？

时至今日，异步电动机变频调速系统与直流电动机调速系统相

比，已经毫不逊色了。

1. 用于二次方律负载　对于离心式风机、水泵一类的二次方律负载，其阻转矩与转速的二次方成正比，转速较低时，阻转矩减小较多，这就要求电动机的电磁转矩也不必太大，以免造成能量的浪费。异步电动机在低频运行时，如不进行补偿，其电磁转矩较小，与负载的特性比较接近。甚至还可以进行“负补偿”，进一步减小电磁转矩，提高节能效果。而直流电动机在额定转速以下，电磁转矩是恒定的，在拖动风机、水泵类负载时，节能效果不佳。如图 10-31 所示。

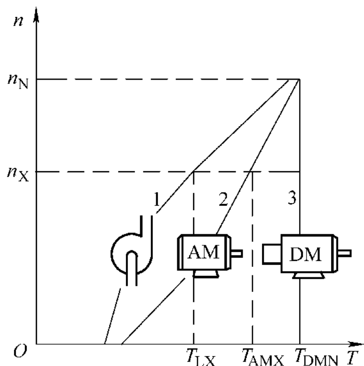


图 10-31　拖动水泵的比较

图中，曲线 1 是水泵的机械特性；曲线 2 是异步电动机变频调速无补偿时的有效转矩线，它与曲线 1 比较接近；曲线 3 是直流电动机调压调速时的有效转矩线，它具有恒转矩的特点，与曲线 1 相距较远，低速时能量不能充分利用。

所以说，当调速系统应用于二次方律负载时，异步电动机低频运行时转矩减小的缺点变成了优点。

2. 额定转速以上的运行特点

（1）直流电动机的运行　如上所述，直流电动机的优点之一，是电枢回路和励磁回路互相独立，故容易实现调速。然而，直流电动机在调速过程中的硬机械特性，是通过两个闭环（电流环和速度环）而得到的。由于其两个电路是互相独立的，两个闭环只可能作用于电枢电路。所以，在额定转速以上的部分（弱磁调速部分），机械特性是较“软”的，如图 10-32b 所示。所以，只能用于拖动辅助运动。以龙门刨床为例，它只能用于刨台返回过程，而不能用于高速切削过程中。

（2）异步电动机的运行　异步电动机中，电流的转矩分量和励磁分量都在同一个电路中，这本是使它难以得到硬机械特性的缺点。然而，一旦成功地通过矢量控制法得到了硬机械特性，由于毕竟只

有一个电路，矢量控制的方法，非但适用于额定频率以下，也同样适用于额定频率以上。因此，在额定转速以上，也可以得到硬机械特性，如图 10-32a 所示，它完全可以应用于龙门刨床的高速切削过程中。

所以，在额定转速以上运行时，直流电动机两个电路互相独立的优点变成了缺点。

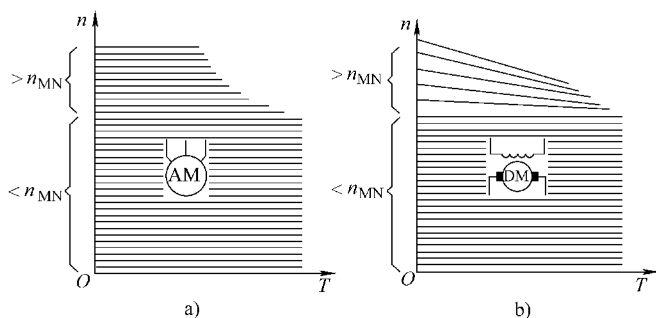


图 10-32　额定转速以上的特性比较

a）异步电动机的特性　b）直流电动机的特性

3. 调速范围　迄今为止，异步电动机矢量控制的调速范围只能达到 1∶1000；而直流电动机的调速范围则可达 1∶10000。所以，在某些调速范围要求很大的特殊场合，异步电动机矢量控制还不能取代直流电动机。

10.4　直接转矩控制

问题 26　直接转矩控制与矢量控制有哪些主要区别?

简单地说，直接转矩控制与矢量控制的主要区别如下：

1. 控制特点　矢量控制以转子磁通的空间矢量为定向（基准）。为此，在控制过程中：

（1）需要电动机的参数多，定向准确度受参数变化的影响较大；

（2）要进行复杂的等效变换（直-交变换、2/3 变换等），调节过

程需要若干个开关周期才能完成，故响应时间较长，大于 100ms。

而直接转矩控制以定子电压的空间矢量为定向（基准）。为此，在控制过程中：

（1）只需要电动机的定子电阻一个参数，既易于测量，定向准确度也高；

（2）不必进行等效变换，故动态响应快，只需 1～5ms；

（3）容易实现无速度传感器控制。

2. 脉宽调制　矢量控制采用正弦脉宽调制（SPWM）方式，故：

（1）必须有 SPWM 发生器，结构复杂；

（2）输出电流的谐波分量较小，冲击电流小；

（3）载波频率是固定的，电磁噪声小。

直接转矩控制不采用正弦脉宽调制（SPWM）方式，而采用“砰-砰”控制（双位控制）方式，逆变电路的开关状态（是否有电压输出），取决于实测转矩信号 T_S^* 与给定转矩信号 T_G^* 之间进行比较的结果：

$T_S^* > T_G^*$→逆变电路有电压输出；

$T_S^* < T_G^*$→逆变电路无电压输出。

因此：

（1）不需要 PWM 发生器，故结构简单，且转矩响应快；

（2）输出电流的谐波分量较大，冲击电流也较大，逆变器输出端常常需要接入输出滤波器或输出电抗器，但这又将导致输出电压偏低；

（3）逆变电路的开关频率不固定，电动机的电磁噪声较大。

问题 27　直接转矩控制是一种比矢量控制更为先进的控制方式吗？

根据清华大学反复实验以及用户使用后的反馈信息来看，直接转矩控制和矢量控制是各有优缺点的。除了上面所述的比较外，一般说来，直接转矩控制在高频运行和低频运行时的实际性能都不如矢量控制。

目前，两种控制方式正在互相渗透。例如，有的变频器在矢量控制方式中加入转矩控制功能；而采用直接转矩控制方式的变频器在低频段也正在借助矢量控制的方法来改善其低频运行特性。

问题28　哪些场合使用直接转矩控制更好？

一般认为，直接转矩控制方式更适用于需要快速转矩响应的大惯性拖动系统中，例如电动机车及交流伺服拖动系统等。

在具有齿轮传动的拖动系统中，转矩的过快变化对齿轮是不利的，故不宜采用直接转矩控制方式。

此外，对于如风机、水泵以及一般工业用拖动系统来说，直接转矩控制也并不优越。

第 11 章　电力电子器件

11.1　电力电子器件在变频器中的作用

问题 1　交-直-交变频的框图是怎样的?

迄今为止，普及应用得最为广泛的是“交-直-交”变频器，其基本框图如图 11-1 所示。

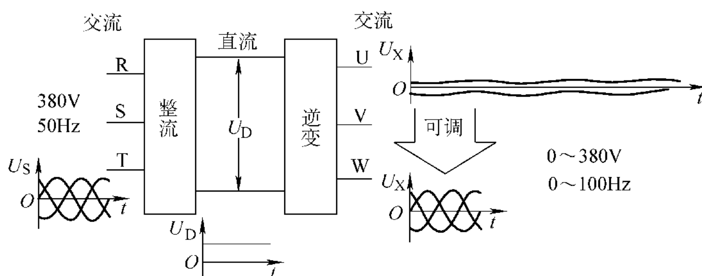


图 11-1　“交-直-交”变频器的框图

变频器的工作可分为两个基本过程：

(1) 先将电源的三相（或单相）交流电全波整流成直流电（交-直变换)，这方面的技术早已解决了，并已为大家所熟知；

(2) 再把直流电“逆变”成频率和电压任意可调的三相交流电(直-交变换)，这是长期以来要解决的核心问题。

问题 2　变频器是怎样把直流变成交流的?

首先通过单相逆变桥的工作情况来看一下直流电是如何“逆变”成交流电的?

单相逆变桥的构成如图 11-2 所示。图中，将四个开关器件（V1、V2、V3、V4）接成桥形电路，两端加直流电压 U_D，负载 Z_L 接至两个“桥臂”的中点 a 与 b 之间。现在来看看负载 Z_L 上是怎样得到交变电压和电流的。

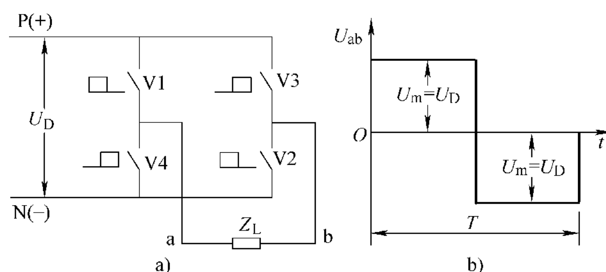


图 11-2　单相逆变桥

a）逆变电路　b）电压波形

1. 前半周期　令 V1、V2 导通；V3、V4 截止。则负载 Z_L 上所得电压为 a“＋”、b“－”，设这时的电压为“＋”。

2. 后半周期　令 V1、V2 截止；V3、V4 导通。则负载 Z_L 上所得电压为 a“－”、b“＋”，电压的方向与前半周期相反，为“－”。

上述两种状态如能不断地反复交替进行，则负载 Z_L 上所得到的便是交变电压了。这就是把直流电“逆变”成交流电的工作过程。

三相逆变桥的工作过程与单相逆变桥相同，只要注意三相之间互隔 $T/3$（T 是周期）就可以了。即，V 相比 U 相滞后 $T/3$，W 相又比 V 相滞后 $T/3$，如图 11-3 所示。具体的导通顺序如下：

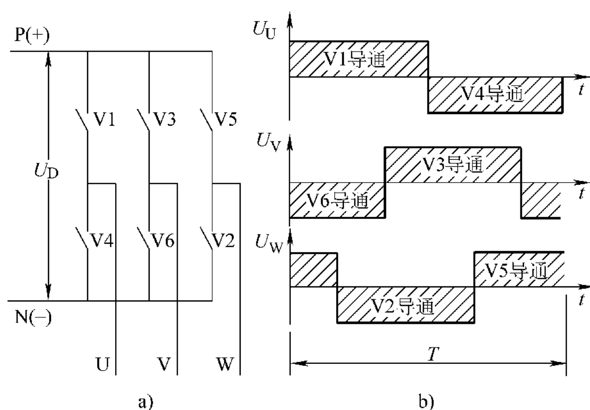


图 11-3　三相逆变桥

a）逆变电路　b）电压波形

第 1 个 $T/6$：V1、V6、V5 导通，V4、V3、V2 截止；

第 2 个 $T/6$：V1、V6、V2 导通，V4、V3、V5 截止；

第 3 个 $T/6$：V1、V3、V2 导通，V4、V6、V5 截止；

第 4 个 $T/6$：V4、V3、V2 导通，V1、V6、V5 截止；

第 5 个 $T/6$：V4、V3、V5 导通，V1、V6、V2 截止；

第 6 个 $T/6$：V4、V6、V5 导通，V1、V3、V2 截止。

总之，所谓“逆变”过程，就是若干个开关器件长时间不停息地交替导通和关断的过程。

问题 3　变频器怎样实现变频又变压的？

在变频器中，电压的平均值是通过调节脉冲宽度和各脉冲间的“占空比”来改变的，称为脉宽调制，常用 PWM 表示，如图 11-4 所示。占空比的定义是：

$$d=\frac{t_P}{t_C} \tag{11-1}$$

式中　d——占空比；

t_P——脉冲宽度（s）；

t_C——脉冲周期（s）。

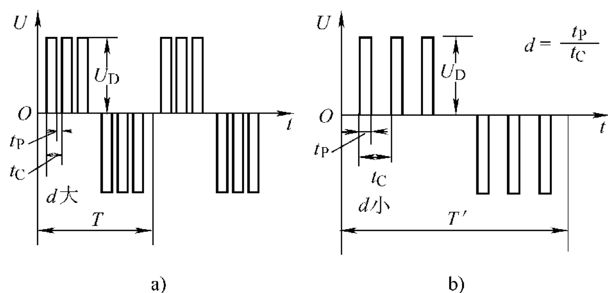


图 11-4　PWM 的含义

a）频率较高　b）频率较低

频率较高时，脉冲的占空比较大，如图 a 所示；频率较低时，脉冲的占空比较小，如图 b 所示，但两者的振幅值是一样的。

PWM 的优点是不必控制直流侧，因而大大简化了电路。

问题 4　什么是正弦波脉宽调制？（SPWM）？

如果脉冲宽度和占空比的大小按正弦规律分布的话，便是正弦脉

宽调制（SPWM），如图11-5所示。当正弦值较大时，脉冲宽度和占空比都大；而当正弦值较小时，脉冲宽度和占空比都小，其电压波形如图a所示。

SPWM的显著优点是：由于电动机的绕组具有电感性，因此，尽管电压是由一系列的矩形脉冲构成的，但通入电动机的电流却和正弦波十分接近，如图b所示。

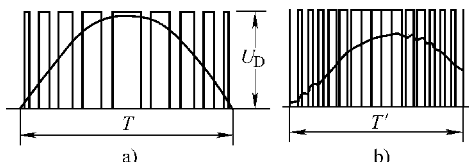


图11-5　SPWM的含义
a）电压波形　b）电流波形

问题5　怎样实现SPWM？

产生SPWM脉冲系列的基本方法是各脉冲的上升沿与下降沿由正弦波和三角波的交点来决定，具体方法又分两种。

1. 单极性调制　特点是在每半个周期内，三角波的极性是单方向的，所得到的脉冲系列的极性也是单方向的，如图11-6所示。通常，正弦波称为调制波，三角波称为载波。

调制时，三角波的振幅是不变的，当正弦波的振幅值较大时，则调制所得的脉冲系列的占空比较大，如图a中之曲线①和图b所示；反之，当正弦波的振幅值较小时，则调制所得的脉冲系列的占空比也较小，如图a中之曲线②和图c所示。

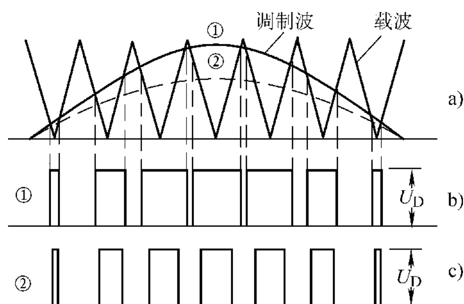


图11-6　单极性调制
a）调制方式　b）电压较高　c）电压较低

在改变频率时，则：

（1）正弦波的频率随给定频率而变；三角波的频率原则上也跟着一起变化，但变化规律在不同品牌的变频器中不尽相同。

（2）正弦波的振幅按比值 U_{1X}/f_X 和给定频率 f_X 同时变化；三角波的振幅则不变。

单极性调制方式易于理解，但由于调制所得的线电压波形并不好，实际上已很少使用。

2. 双极性调制　实际变频器中，更多地使用双极性调制方式，其特点是：三角波和所得到的相电压脉冲系列都是双极性的，但线电压脉冲系列却是单极性的，如图 11-7 所示。

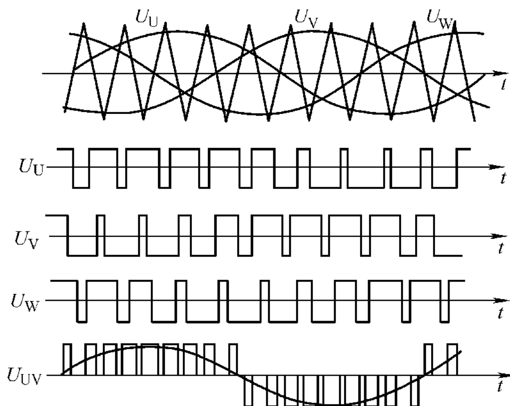


图 11-7　双极性调制

双极性调制的工作特点是：每个桥臂的上下两管总是处于不断地交替导通的状态。

问题 6　什么是电流跟踪的 PWM 控制？

1. 指导思想　归根到底，人们希望，经过 PWM 调制后所得到的电流波形能够无限接近于正弦波。基于这样的想法，如果让实际电流实时地与标准的正弦波进行比较，由比较结果来决定脉宽调制的上升沿和下降沿，从而达到使变频器的输出电流无限接近于正弦波的目的。

2. 调制波的产生　如图 11-8 所示。

i_a^* 是标准正弦电流的波形，是进行比较的基准。i_a 是实测电流的波形。

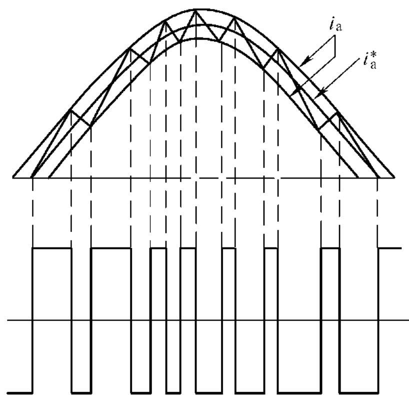


图 11-8　电流跟踪的含义

调制波的上升沿与下降

沿按如下方式决定：

当 $i_a < i_a^*$ 时，则脉冲上升；

反之，当 $i_a > i_a^*$ 时。则脉冲下降。

电流跟踪的 PWM 调制也是双极性调制。

问题 7　变频器对电力电子器件有些什么要求？

逆变桥是实现变频的关键部分，构成逆变桥的开关器件必须满足以下要求：

1. 能承受足够大的电压　我国三相交流电的线电压为 380V，经三相全波整流后的直流电压的峰值为 537V。所以，开关器件能够承受的电压必须超过 537V，如图 11-9 所示。目前，各低压变频器中所用开关器件的耐压均为 1200V。

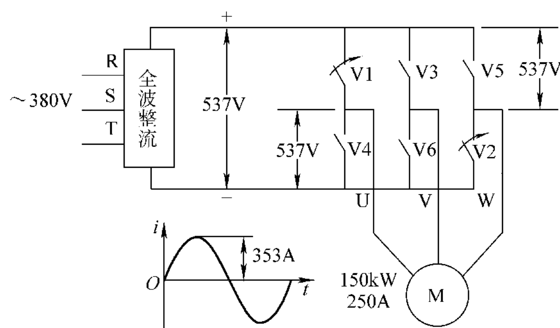


图 11-9　逆变管承受的电压和电流

2. 能承受足够大的电流　电动机的额定容量大至成百上千千瓦，额定电流高达数千安，不言而喻，逆变管允许通过的电流至少应超过电动机电流的振幅值。

3. 允许长时间频繁地接通和关断　这是由逆变电路的工作过程所决定的。

4. 开通时间和关断时间应尽量地短　一方面，可提高载波频率，改善电流波形；另一方面，可缩短上下两个器件在交替导通过程中的死区时间，提高调制后的平均电压，如图 11-10 所示。图 a 是双极性调制时电压波形的一部分；交替导通过程如图 b 所示：从 V1 和 V4 交替导通时，必须等待导通管完全关断后，另一个管子才能开始导

通，所需等待时间 Δt 即为死区。死区实际上是不工作区，故死区时间越长，变频器输出的平均电压越低。

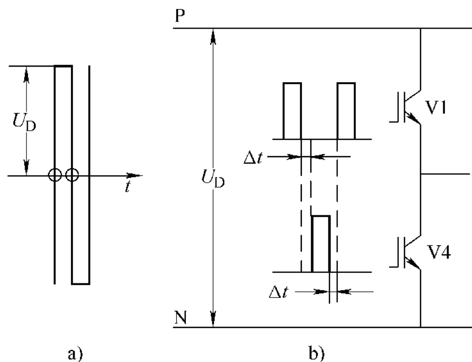


图 11-10　交替导通时的死区

a）双极性调制波形　b）交替导通的死区

11.2　晶闸管（SCR）

问题 8　晶闸管有哪些基本特点？

1. 晶闸管的“极”　图 11-11a 是晶闸管在电路中的符号。它有三个极：

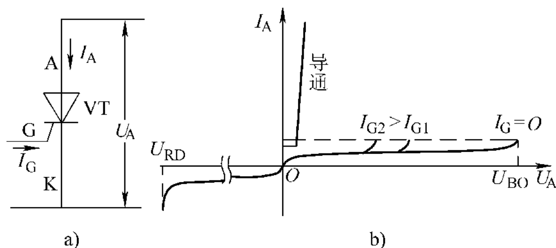


图 11-11　晶闸管及其工作特点

a）晶闸管的符号　b）晶闸管的特性

（1）阳极 A　当接至电源的“+”端时，晶闸管才有可能导通；

（2）阴极 K　当接至电源的“-”端时，晶闸管才有可能导通；

（3）门极 G　也叫控制极，用于控制晶闸管的导通。当门极与阴

极之间施加正电压时，晶闸管导通。

从阳极 A 流向阴极 K 的电流 I_A 称为阳极电流；从门极 G 流向阴极 K 的电流 I_G 称为门极电流或控制电流；阳极和阴极之间的电压 U_A 称为阳极电压，在导通情况下，则为晶闸管的管压降。

2. 晶闸管的特性　如图 11-11b 所示：

当门极电流 $I_G=0$ 时，阳极电流 $I_A=0$，晶闸管处于截止状态；

当门极电流 $I_G\neq0$ 时，阳极电流 I_A 急剧上升，晶闸管处于导通状态。这时，管压降极小；

I_G 越大，则导通越快；

如阳极与阴极之间加反向电压时，晶闸管将始终处于截止状态。

问题 9　晶闸管在直流电路里的工作特点是怎样的?

晶闸管接在直流电路中的情形如图 11-12 所示，U_C 为电源电压，HL 是负载，VTH 是晶闸管，U_A 是管压降。

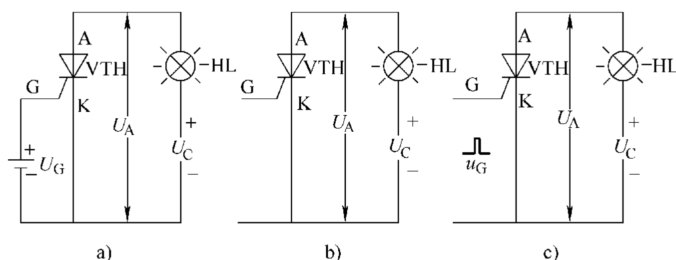


图 11-12　晶闸管在直流电路中

a）门极加正信号　b）撤消门极信号　c）门极加脉冲信号

当门极与阴极之间加入正电压信号 U_G 时，VTH 导通，如图 a 所示。

当门极与阴极之间撤消 U_G 时，VTH 将继续保持导通状态，如图 b 所示。

根据上述特点，只要在门极与阴极之间加入一个脉冲信号 u_G，则 VTH 即可保持导通状态，如图 c 所示，u_G 称为触发脉冲。

问题 10　晶闸管在交流电路里的工作特点是怎样的?

晶闸管接在交流电路中的情形如图 11-13 所示，u_C 为交流电压，R_L 是负载。

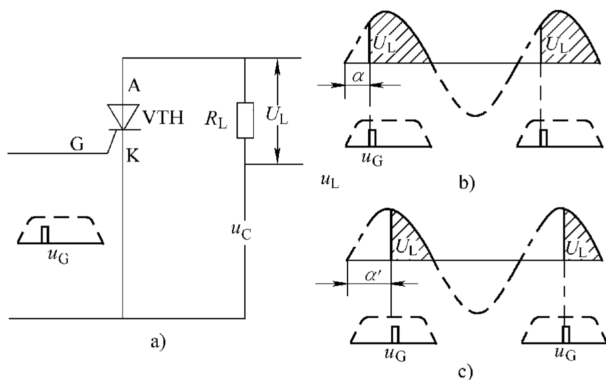


图 11-13　晶闸管在交流电路中

a）基本电路　b）移相角较小　c）移相角较大

在 u_C 的正半周，如在门极与阴极之间加入触发脉冲 u_G，则 VTH 导通。

在 u_C 的负半周，由于阳极与阴极之间施加的是反向电压，故 VTH 截止。

从晶闸管开始承受正向电压到出现触发脉冲之间对应的电角度 α 称为移相角。比较图 b 和图 c 可知：α 较小时，负载上得到的平均电压 U_L 较大；反之，如将移相角增大为 α'，则 U_L 较小。

所以，改变移相角的大小，就可以调节负载所得到的平均电压了。

问题 11　晶闸管有哪些主要参数？

1. 额定电压 U_{RN}　晶闸管不被击穿的最大瞬时电压。

2. 额定电流 I_R　在晶闸管的结温不超过额定结温的条件下，所允许的最大通态平均电流。

3. 通态平均电压 U_R　在额定电流和额定结温的条件下，阳极与阴极间电压降的平均值，简称管压降。

4. 维持电流 I_H　在室温和门极断开的条件下，晶闸管从较大通态电流降至能保持导通的最小电流。

5. 擎住电流 I_L　晶闸管在刚导通就去除触发电压后，能够使管子维持导通的最小阳极电流。通常，I_L 比 I_H 大数倍。

6. 门极触发电压 U_G 和触发电流 I_G　在室温下，当阳极电压等于 6V 时，使晶闸管从截止状态转入导通状态所需要的最小门极电流，称为触发电流，对应的门极电压称为触发电压。

问题 12　晶闸管逆变电路有什么特点？

由晶闸管构成的逆变桥如图 11-14 所示，U_D 是直流回路的电压，设平均值为 $U_D=513V$。

因为在直流电路中，晶闸管导通后是不能自行关断的。要想关断已经导通的晶闸管，必须在晶闸管两端加反向电压。图 11-14 是主电路的大致结构，说明如下：

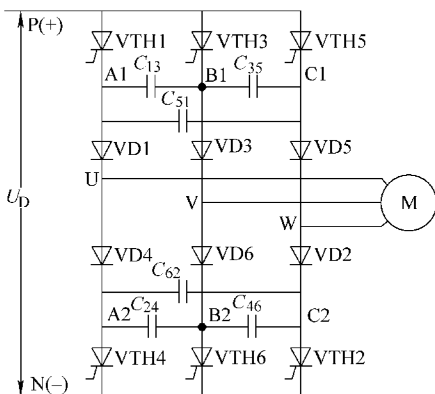


图 11-14　晶闸管逆变电路

假设晶闸管 VTH1 已经处于导通状态，这时，A1 点的电位与直流正端（P 端）相同，而如果 VTH3 和 VTH5 都处于截止状态的话，则 B1 点和 C1 点都是 0 电位。如要关断 VTH1，必须令 VTH3 或 VTH5 导通，今假设 VTH3 导通。在 VTH3 导通的瞬间，B1 点的电位突然上升 513V，由于电容器 C_{13} 两端的电压是不能跃变的，故 A1 点的电位也同时上升 513V，使 VTH1 的阴极电位高于阳极电位，从而迫使 VTH1 截止。

所以，在图 11-14 中，各电容器是用来使各晶闸管相互关断的；二极管 VD1 ~ VD6 则用于隔开逆变桥的上下两个桥臂的。

问题 13　以晶闸管为逆变管的变频器有什么特点？

如上述，晶闸管逆变桥是由同一侧的晶闸管相互关断的，所以，输出的电压波是矩形波，如图 11-15a 所示；而电流波则如图 11-15b 所示。

晶闸管变频器除了电压和电流波形不好外，并且因为用于相互关断的电容器要求电压较高、容量也较大，故价格昂贵。除此以外，在不同的负载电流下，晶闸管的关断条件也并不一致，这又影响了其工作的可靠性。

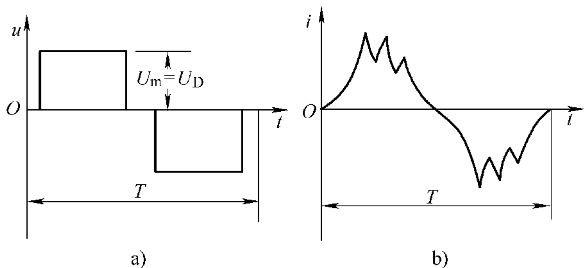


图 11-15　晶闸管逆变的电压和电流波形
a）电压波形　b）电流波形

所以，晶闸管虽然使变频调速成为了可能，实现了近百年来人们对于变频调速的企盼。但由于缺点较多，并不能达到普及推广的阶段。

11.3　电力晶体管（GTR 或 BJT）

问题 14　电力晶体管与普通晶体管有什么区别？

电力晶体管实际上是由两个或多个晶体管复合而成的复合晶体管（达林顿管）构成，如图 11-16 所示。也称为大功率晶体管（GTR）或双极型晶体管（BJT）。复合后的集电极就作为 GTR 的 C 极；复合后的发射极就作为 GTR 的 E 极；复合后的基极就作为 GTR 的 B 极，如图 a 所示。

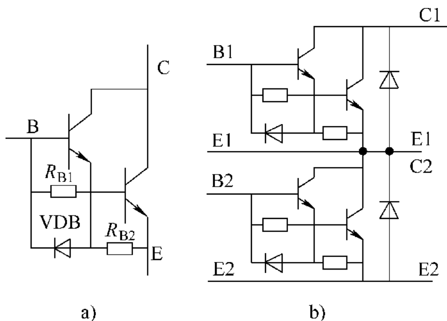


图 11-16　电力晶体管的内部电路
a）单管模块电路　b）双管模块电路

由于在变频器内，主要用于逆变桥，故常把两个 GTR 集成到一起，做成双管模块如图 b 所示，也有把六个 GTR 集成到一起，做成六管模块的。

又因为在变频器中，各逆变管旁边总要反并联一个二极管，所以，模块中的 GTR 旁边，都已经把反并联的二极管也放进去了。

问题 15　电力晶体管的工作状态与普通晶体管相同吗？

就基本工作状态而言，电力晶体管和普通晶体管是一样的，也有三种状态：

1. 放大状态　集电极电流的大小由基极电流来决定（图 11-17a）：

$$I_C = \beta I_B \tag{11-2}$$

式中　I_C——集电极电流（A）；

I_B——基极电流（A）；

β——电流放大倍数。

GTR 两端承受的电压为

$$U_{CE} = U_C - I_C R_C \tag{11-3}$$

式中　U_{CE}——GTR 的集电极与发射极之间承受的电压（V）；

U_C——电源电压（V）；

I_C——集电极电流（A）；

R_C——集电极电阻（负载电阻）（Ω）。

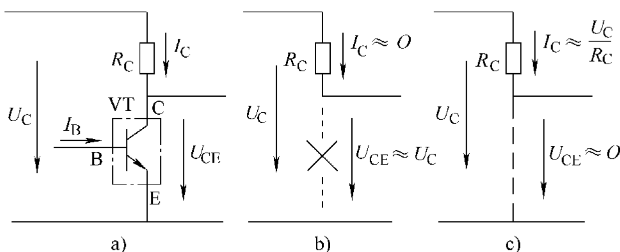


图 11-17　电力晶体管的工作状态

a）放大状态　b）截止状态　c）饱和导通状态

2. 截止状态　当基极电流等于 0 时，GTR 处于截止状态，如图 b 所示，这时：

$I_C \approx 0$A（只有极小的泄漏电流）；

$U_{CE} \approx U_C$（C、E 间承受电源全电压）。

3. 饱和导通状态　当 $I_B > U_C/R_C$ 时，GTR 处于饱和导通状态，如图 c 所示，这时：

管压降接近于 0V（实际约为 2 ~ 3V）；

$$U_{CE} \approx 0V$$

集电极电流基本上取决于欧姆定律：

$$I_C \approx \frac{U_C}{R_C}$$

问题 16　GTR 的主要参数有哪些？

1. 截止状态下的主要参数

（1）击穿电压　在截止状态下能使集电极与发射极之间击穿的最小电压。在基极开路时，用 U_{CEO}表示，在基极与发射极之间反向偏置时，用 U_{CEX}表示，在大多数情况下，两者的数值是相等的。在 380V 等级的变频器中，通常选用 $U_{CEO}=1200V$。

（2）漏电流　在截止状态下从集电极流向发射极的电流。在基极开路时，用 I_{CEO}表示，在基极与发射极之间反向偏置时，用 I_{CEX}表示。

2. 饱和导通状态下的参数

（1）集电极最大电流　饱和导通时的集电极最大允许电流，用 I_{CM}表示。

（2）饱和电压降　饱和导通时，集电极和发射极之间的电压降，用 U_{CES}表示。

3. 开关过程中的参数

（1）开通时间　从基极通入正向信号电流 I_{B1}时起，到集电极电流上升到饱和电流的 90%（$0.9I_{CS}$）所需要的时间，用 t_{ON}表示，如图 11-18 所示。

（2）关断时间　从基极电流撤消（或加入反偏基极电流 I_{B2}）时起，到集电极电流下降至饱和电流的 10%（$0.1I_{CS}$）所需要的时间，用 t_{OFF}表示，如图 11-18 所示。

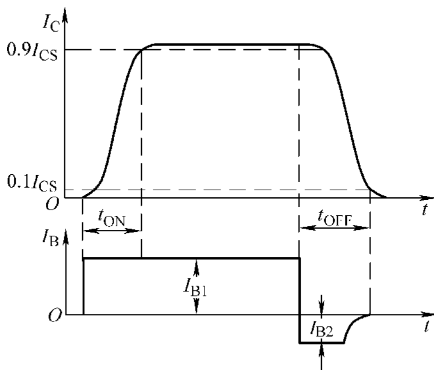


图 11-18　GTR 的开关时间

开通时间和关断时间的大小，将直接影响到脉宽调制时的载波频率。使用 GTR 时的上限载波频率为 2kHz，

实际使用的载波频率在 1. 5kHz 以下。

问题 17　GTR 的基极驱动电路有什么特点？

总的指导思想是：尽量缩短开通与关断的时间。如图 11-19 所示：

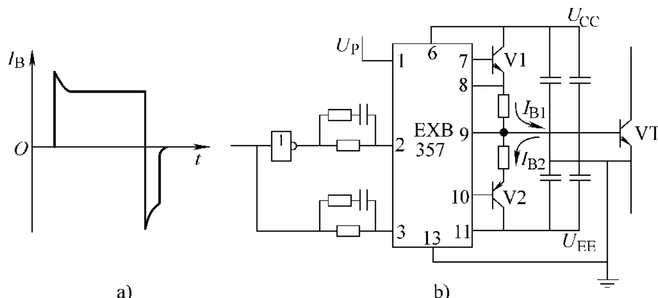


图 11-19　GTR 的驱动

a）对驱动电流的要求　b）集成驱动电路举例

1. 从截止转为饱和　为了使 GTR 尽快进入饱和状态，开始导通时的基极电流应大一些。当 GTR 已经进入饱和状态后，为了便于在切换时容易退出饱和状态，应适当减小基极电流，减轻饱和深度。

2. 从截止转为饱和　为了使 GTR 尽快截止，应在基极 B 和发射极 E 之间进行反向偏置。在 B-E 间刚开始加入反向电压时，基区里过剩的载流子被迅速抽出，故有较大的反向电流。

由于 GTR B、E 间的反向击穿电压 U_{EBO}较低（常小于 6V），为了防止在反向偏置时被击穿，在 B、E 间须接入保护电阻或二极管，如图 11-16a 中之 R_{B1}、R_{B2}和 VDB 所示。

目前，GTR 的驱动大多采用集成驱动电路，如图 11-19b 所示。图中，晶体管 V1 和 V2 构成外接的互补驱动电路，V1 用于向 GTR（VT）提供正向驱动电流，V2 则提供反向偏置。

问题 18　GTR 的缓冲电路起什么作用？

缓冲电路的主要作用是减小 GTR 从饱和转为截止时，C-E 之间的电压变化率。基本缓冲电路的结构如图 11-20 所示。以 VT1 为例，说明如下：

当 VT1 从饱和状态转为截止状态时，C-E 间的电压将由接近于

0V 迅速上升至直流电压值 U_D（≈513V），这过高的电压变化率将导致 GTR 的损坏。

图中，减小电压变化率的关键元器件是电容器 C_{01}。因为 C_{01} 两端的电压不能跃变，这就减缓了 U_{CE} 的上升速率。

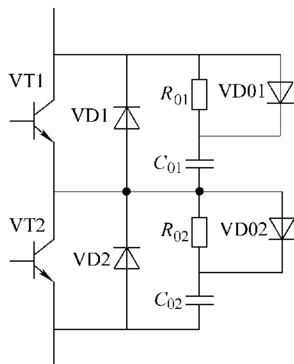


图 11-20　缓冲电路

在 VT1 截止期间，C_{01} 上的电压将充至 513V。当 VT1 又转为饱和导通时，C_{01} 上的 513V 电压将直接向 VT1 放电，产生十分强大的冲击电流，足以导致 GTR 的损坏。为了减小放电电流，在放电回路中串入了电阻 R_{01}。

但 R_{01} 的接入，又将影响 C_{01} 减缓电压变化率的作用。为此，用一个二极管 VD01 和 R_{01} 并联。由于二极管具有钳位作用，所以，当 VT1 从饱和转为截止时，C_{01} 减缓电压变化率的作用不受影响；而当 VT1 从截止转为饱和时，C_{01} 的放电电流则能够被 R_{01} 削弱。

实际的缓冲电路常在此基础上进行许多改进和补充，这里不再赘述。

问题 19　为什么 GTR 模块的额定功率比电压与电流的乘积小很多？

以某 $U_{CEO}=1200V$、$I_{CM}=300A$ 的 GTR 为例，其额定功率只有 $P_C=2kW$。而如果按电压与电流的乘积计算的话，功率可达 360kW！

这是因为，在变频器中的 GTR，是作为开关器件来应用的。就是说，只应用其截止与饱和两种状态。

在截止状态下，由于泄漏电流极小，GTR 消耗的功率微不足道。而在饱和状态下，GTR 的饱和电压降常不足 5V，如按 5V 计，则当电流为 300A 时，功耗为 1.5kW。可见，GTR 的额定功率是在饱和状态下功耗的基础上，适当留有余量而确定的。

问题 20　以 GTR 为逆变管的变频器有些什么特点？

GTR 变频器的逆变电路如图 11-21a 所示，其主要特点有：

1. 输出电压　可以采用脉宽调制方式，故输出电压为幅值等于

直流电压的强脉冲序列，如图 b 所示。

2. 载波频率　GTR 由于开通和关断时间较长，故允许的载波频率较低，大部分变频器的上限载波频率约为 1.2～1.5kHz。

3. 电流波形　因为载波频率较低，故电流的谐波成分较大，如图 c 所示。这些谐波电流将在硅钢片中形成涡流，并使硅钢片相互间因产生电磁力而振动。又因为载波频率处于人耳对声音较为敏感的区域，故电动机有较强的电磁噪声。

4. 输出转矩　因为电流中谐波的成分较大，故在 50Hz 时，电动机轴上的输出转矩与工频运行时相比，略有减小。

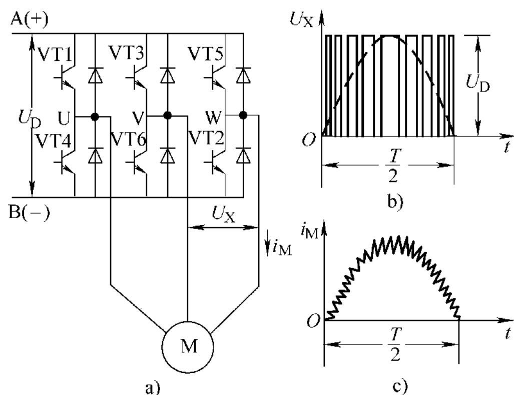


图 11-21　GTR 变频器的主要特点

a）逆变电路　b）电压波形　c）电流波形

问题 21　为什么电源停电时变频器中的 GTR 容易烧坏？

1. 变频器内的直流电源　变频器内主要有三种直流电源：

（1）主电路直流电源　即电源电压经全波整流后的直流电压，由于受电解电容器规格的限制，滤波电容的容量不可能很大。

（2）驱动电路的直流电源　如问题 17 中所述，因为要求 GTR 的基极电流在快速饱和后又略有减小，故滤波电容的容量不宜太大，使基极电流在维持过程中，滤波电容上的电压能自动地下降一点。

（3）控制电路的直流电源　控制电路的主体是微机电路，对电源的稳定性要求极高，故滤波电容的容量很大。

2. 停电时各电源的衰减速度

（1）主电路电源的衰减　主电路滤波电容的容量虽然不是最大，但因为电动机属于电感性负载，故停电后电压的衰减速度并不很快。

（2）驱动电源的衰减　由于驱动电路的滤波电容的容量较小，且由于 GTR 的放大倍数不大（多数 GTR 的 β 值为 75 左右），基极电流并不很小，故衰减速度较快。

（3）控制电源的衰减　如上述，其滤波电容的容量很大，而控制电路的电流通常是毫安级的，故衰减时间很长，可达数十秒。

3. 停电后 GTR 的状态　一方面，控制电路还能维持正常工作，另一方面，由于 GTR 的基极电流减小较快，GTR 很容易脱离饱和而进入放大状态，C、E 间的电压迅速上升，以问题 19 中的 GTR 为例，假设实际电流为 200A，U_{CE}为 50V，则 GTR 的功耗为：

$$P_C' = 50 \times 200 = 10000\text{W} = 10\text{kW} >> 2\text{kW}$$

所以，遇到突然停电时，如果变频器未设置相应保护功能的话，GTR 很容易因进入放大状态而烧坏。

11.4　门极关断（GTO）晶闸管

问题 22　什么是门极关断晶闸管？

1. 概述　门极关断晶闸管常简称可关断晶闸管，用 GTO 表示，其基本结构和普通晶闸管类似，它的三个极也是阳极（A）、阴极（K）和门极（G）。在电路中的符号也和普通晶闸管相似，只是在门极上加一短线，以示区别，如图 11-22a 所示。

2. 工作特点

（1）在门极上加正电压或正脉冲（图 11-22b 中之开关 SG 投向位置“1”），则 GTO 导通。其后，即使撤消信号（SG 恢复至位置“0”），GTO 保持导通状态，这和普通晶闸管的导通过程完全相同。

（2）如在 G、K 之间加入反向电压或较强的反向脉冲（开关 SG 投向位置“2”），可使 GTO 关断。

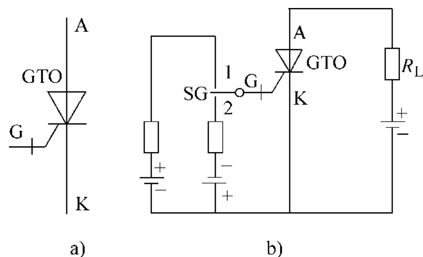


图 11-22　门极关断晶闸管
a）GTO 的符号　b）触发方式

问题 23　门极关断晶闸管的主要参数有哪些？

1. 最大可关断阳极电流 I_{RM}　即用门极控制的方法能够关断的最大阳极电流。

2. 通态有效电流 I_R　GTO 在导通状态下，能够承受的最大电流。

3. 关断状态最大电压 U_{RM}　在关断状态下，能够承受而不被击穿的最大电压。

4. 维持电流 I_H　能够使 GTO 保持导通状态的最小阳极电流。

5. 擎住电流 I_L　刚从断态转入通态，在立即取消门极电流的情况下，能够保持通态的最小电流。

6. 通态电压 U_R　GTO 在导通状态下，阳极与阴极间的电压降。

7. 门极最小触发电流 I_{GL}　GTO 由断态转入通态所需的最小触发电流。

8. 门极反向关断电流 I_{GR}　GTO 由通态转入断态所需的反向关断电流。

9. 开通时间 t_{ON}　GTO 由断态转入通态所需时间。

10. 关断时间 t_{OFF}　GTO 由通态转入断态所需时间。

问题 24　门极关断晶闸管的门极驱动电路有什么特点？

1. 对门极触发信号的要求

（1）正向门极触发电流　正向触发脉冲如图 11-23a 所示，其主要特点是：

1）前沿陡度应尽量地大，一般要求：

$$di_{G1}/dt \geqslant 5A/\mu s$$

2）触发脉冲宽度约为 10～60μs；

3）触发脉冲的后沿陡度应比较平缓。

（2）反向门极关断电流　如图 b 所示，主要特点是：

1）前沿陡度应尽量地大，一般要求：

$$di_{G2}/dt \geqslant 10A/\mu s$$

2）关断脉冲宽度应≥30μs；

3）门极关断电流的幅值应满足：

$-I_{GM} = (1/5 \sim 1/3) I_R$

可见，关断电流是相当大的。

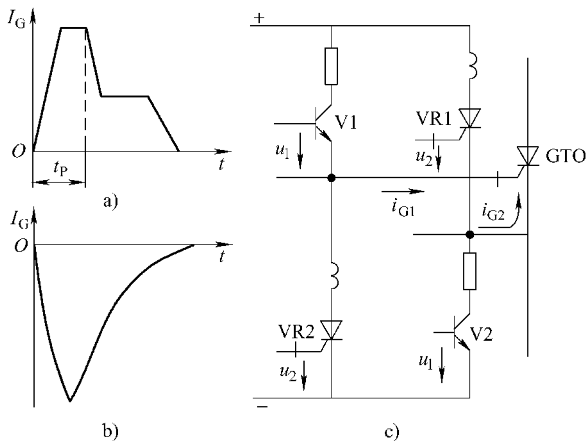


图 11-23　GTO 的触发

a）触发信号　b）反向门极关断电流　c）触发电路举例

2. 门极触发电路举例　如图 11-23c 所示。

（1）开通过程　令晶体管 V1、V2 导通，则触发电流 i_{G1} 从 GTO 的门极流向阴极，使 GTO 开通；

（2）关断过程　令晶闸管 VR1 和 VR2 导通，则关断电流从 GTO 的阴极流向门极，使 GTO 关断。

问题 25　门极关断晶闸管主要用于何种变频器？

门极关断晶闸管因为具有 GTR 那样的可关断能力，也可以应用脉宽调制技术来实现变频调速。在变频器中的应用大致如下：

由于开关频率较低，通常低于 1kHz，故在中小容量变频器中已基本不用；

但其基本结构与晶闸管相同，故具有高电压、大电流特点。迄今，最高水平已超过 10kA、12kV。所以成为高电压、大容量变频器中的主要逆变器件。

11.5　功率场效应晶体管（Power MOSFET）

问题 26　功率场效应晶体管有哪些基本特点？

1. 图形与符号　场效应晶体管的图形符号如图 11-24a 所示。它

也有三个极，分别是源极（S）、漏极（D）和栅极（G）。场效应晶体管用 MOSFET 来表示，在电路中，可简单地用符号 VM 表示（图 b）。

2. 工作特点　G、S 间的控制信号是电压信号 u_{GS}，改变 u_{GS} 的大小，主电路的漏极电流 I_D 也跟着改变。由于 G、S 间的输入阻抗很大，故控制电流几乎为 0，所以，驱动功率很小。

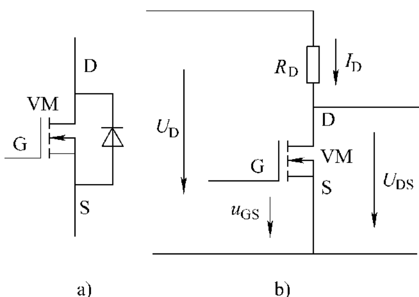


图 11-24　功率场效应晶体管
a）图形符号　b）基本接法

问题 27　功率场效应晶体管有哪些主要参数？

1. 最大漏极电流 I_{DM}　是允许连续运行的最大漏极电流。

2. 击穿电压 U_{DS}　在截止状态下，漏极与源极之间的最大维持电压。

3. 导通电阻 R_{ON}　是 MOSFET 在饱和导通时，D-S 间的电阻值。R_{ON}具有正温度系数，即电流越大，R_{ON}的值也因温度的升高而增大。所以，VM 具有自动抑制电流的能力。

4. 阀值电压 U_{GS}　能够使 MOSFET 导通的最低栅极电压。实际使用时，所需栅极电压应为 U_{GS}的 1.5 ~2.5 倍。在多数情况下，栅极电压都设计为 15V。

5. 开关频率　MOSFET 的开关频率比 GTR 高 1 ~2 个数量级，最高可达 500kHz 以上。

问题 28　功率场效应晶体管的驱动电路有什么特点？

1. 对栅极控制电压的要求　比较理想的栅极控制电压的波形如图 11-25a 所示。从截止转为导通时，应适当提高栅极电压 u_{G1}的上升率，以缩短开通时间；从导通转为截止时，应适当加入负偏压 u_{G2}，以加快关断过程。

2. 驱动电路举例　如图 b 所示，说明如下：

当驱动信号 u_I 为“+”时，晶体管 V1 导通，V2 截止，则 G、S 间加入正向栅压，使 VM 导通；当驱动信号 u_I 为“-”时，晶体管 V1 截止，V2 导通，则 G、S 间加入反向偏压，使 VM 截止。

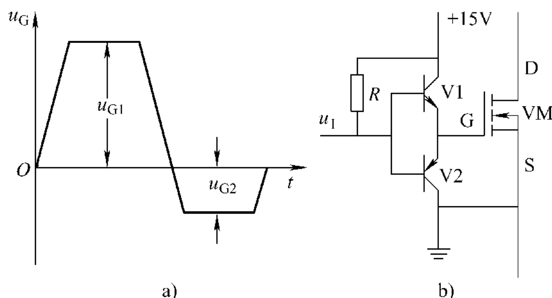


图 11-25　MOSFET 的驱动

a）驱动信号　b）驱动电路举例

问题 29　功率场效应晶体管变频器有什么特点？

用功率场效应晶体管作为变频器的逆变器件时，由于载波频率较高，故电动机的电流波形较好，不再有电磁噪声，是比较理想的功率器件。

但迄今为止，功率场效应晶体管的额定电压和额定电流都还不够大。所以，只能作为电压较低（如 220V），容量较小的变频器逆变器件。

11.6　绝缘栅双极型晶体管（IGBT）

问题 30　IGBT 的基本特点有哪些？

1. 结构特点　绝缘栅双极型晶体管（IGBT）是场效应晶体管（MOSFET）和电力晶体管（GTR）相结合的产物。其主体部分与 GTR 相同，也有集电极（C）和发射极（E），而控制极的结构却与 MOSFET 相同，是绝缘栅结构，也称为栅极（G），如图 11-26a 所示。

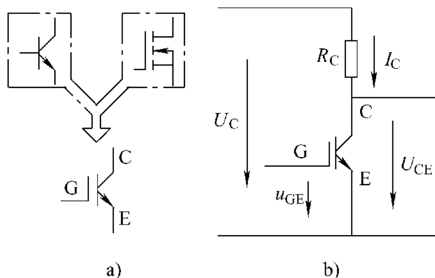


图 11-26　IGBT 的基本特点

a）结构特点　b）基本电路

2. 工作特点

（1）控制部分　控制信号为电压信号 u_{GE}，栅极与发射极之间的输入阻抗很大，

故信号电流与驱动功率（控制功耗）都很小。

（2）主体部分　因为与 GTR 相同，额定电压与电流容易做得较大，故在中小容量的变频器中，IGBT 已经完全取代了 GTR。

就是说，IGBT 是一种以极小的控制功率来控制大功率电路的器件。

变频器所用的 IGBT，通常已经制作成各种模块，如图 11-27 所示。图 a 是双管模块，图 b 是六管模块。

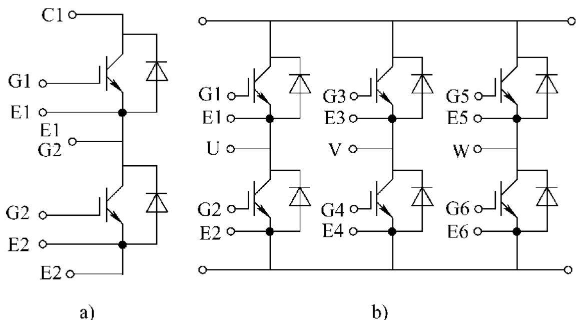


图 11-27　IGBT 模块

a）双管模块　b）六管模块

问题 31　IGBT 的主要参数有哪些？

1. 集电极-发射极额定电压 U_{CES}　是 IGBT 在截止状态下集电极与发射极之间能够承受的最大电压。

2. 栅极-发射极额定电压 U_{GES}　是栅极与发射极之间允许施加的最大电压，通常是 20V。

3. 集电极额定电流 I_C　是 IGBT 在饱和导通状态下，允许持续通过的最大电流。

4. 集电极-发射极饱和电压 U_{CE}　是 IGBT 在饱和导通状态下，集电极与发射极之间的电压降。

5. 开关频率　由于 IGBT 的开通时间和关断时间都很小，故开关频率较高，可达 30～40kHz。在变频器中，实际使用的载波频率大多在 15kHz 以下。

问题 32　以 IGBT 为逆变管的变频器有什么特点？

以 IGBT 为逆变管的变频器的逆变电路与 GTR 的逆变电路基本相

同，如图 11-28a 所示。其主要特点如下：

1. 载波频率高　大多数变频器的载波频率可在 3 ~ 15kHz 的范围内任意可调，其电压波形如图 b 所示。载波频率高的结果是电流的谐波成分减小，电流波形如图 c 所示。

2. 功耗减小　由于 IGBT 的驱动电路取用电流极小，几乎不消耗功率。而 GTR 基极回路的取用电流常常是安培级的，消耗的功率不可小视。

3. 瞬间停电可以不停机　这是因为，IGBT 的栅极电流极小，停电后，栅极控制电压衰减较慢，IGBT 不会立即进入放大状态。故在瞬间停电后，变频器允许自动重合闸，而可以不必跳闸。

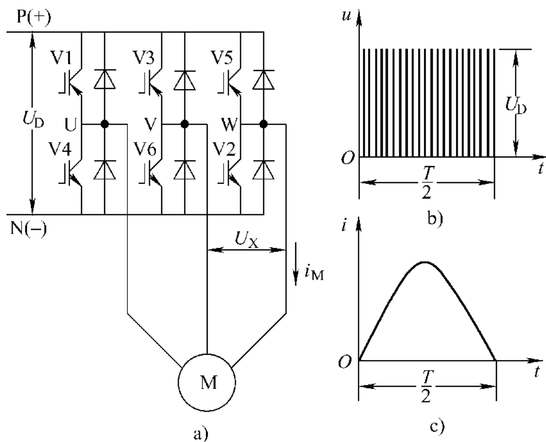


图 11-28　IGBT 变频器的主要特点

a）逆变电路　b）电压波形　c）电流波形

问题 33　智能功率模块（IPM）是怎样构成的？

所谓智能功率模块，是把与逆变管配套的驱动电路、检测与保护电路以及某些接口电路等和功率模块都集成到一起的功率集成模块，通常用 IPM 表示。其内部电路如图 11-29 所示。说明如下：

1. 控制侧　如图，U_P、V_P、W_P 是与直流电路正端相接的各 IGBT 的控制输入端；U_{FO}、V_{FO}、W_{FO}是这些逆变管的保护输出端；U_N、V_N、W_N 则是与直流电路负端相接的各 IGBT 的控制输入端；FO 是它们共同的保护输出端。

2. 输出侧　P为直流电源“+”端，N为“−”端；

U、V、W为三相交流输出端；

B为外接制动电阻的接线端，由图知，该模块除了包含完整的逆变电路外，还把制动单元及其驱动电路也包括进去了。

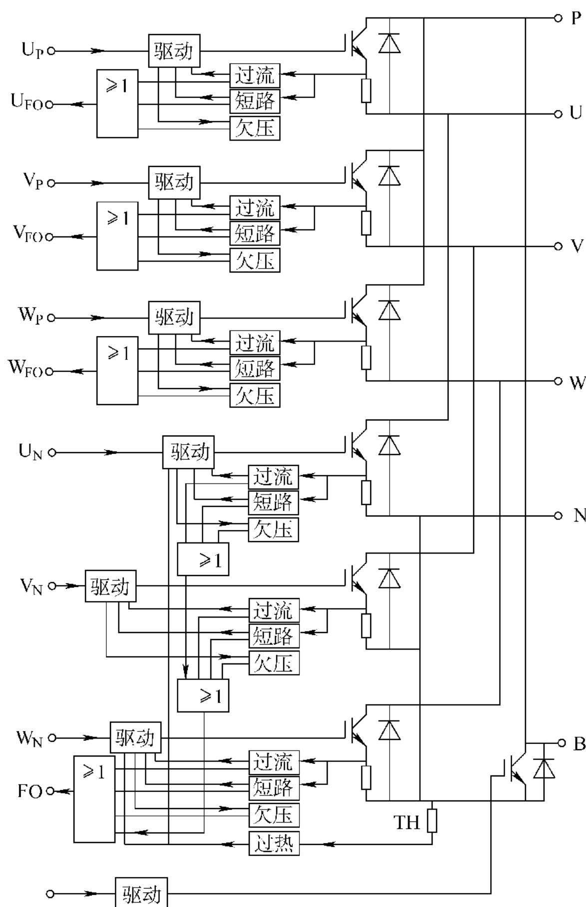


图11-29　IPM的内部电路

问题34　智能功率模块有哪些主要优点？

1. 驱动可靠　由于驱动电路是内含的，不必另行选择，故可设计成与IGBT配合得最好的电路。

此外，由于驱动电路与 IGBT 之间和距离很短，更加提高了其工作可靠性。

2. 内含多种保护电路　如过流保护、短路保护、欠电压保护等电路，由于其检测都在内部进行，既十分方便，也极大地提高了检测的灵敏度和准确性，还减小了检测部分的功耗。

3. 内含过热保护　用于保护 IGBT 和续流二极管的过热。一旦结温过高，将立即报警，大大提高了保护的灵敏度。

4. 散热效果好　这是由于采用了陶瓷绝缘结构、模块可以直接安装在散热板的缘故。

5. 进一步缩小了体积，节省了使用者设计电路的时间。

问题 35　IGBT 在变频器中的主要运行数据有哪些?

1. 饱和导通状态　变频器中，要使 IGBT 饱和导通，在 G、E 间，须加 12 ~ 20V 的驱动电压。IGBT 的饱和压降 $U_{CES}<3V$，如图 11-30a 所示。

2. 截止状态　要使 IGBT 截止，须在 G、E 间施加 −15 ~ −5V 电压。当 IGBT 截止时，C、E 间承受的是直流回路的电压，平均值为 513V，如图 b 所示。

3. 开通与关断时间　电流从 10% I_{CM} 上升到 90% I_{CM} 所需要的时间，称为开通时间，用 t_{ON} 表示；电流从 90% I_{CM} 下降到 10% I_{CM} 所需要的时间，称为关断时间，用 t_{OFF} 表示，如图 c 所示。

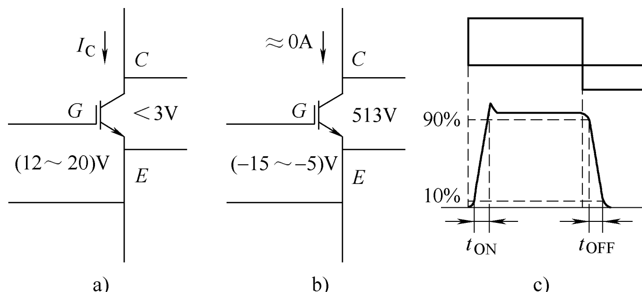


图 11-30　逆变管的运行数据

a）饱和导通状态　b）截止状态　c）开通与关断时间

问题 36　为什么温度偏高时变频器还可以降额使用?

1. 安全运行的条件　变频器能否安全运行的一个很重要的方面，

是同一桥臂的两个 IGBT 在交替导通过程中会不会直通。就是说，在上管的截止指令与下管的导通指令之间所留的死区 Δt 是否足够。

2. 最关键因素　是 IGBT 的关断时间 t_{OFF}，如图 11-31a 所示。而影响关断时间 t_{OFF} 的因素有：

（1）环境温度　环境温度高，关断时间 t_{OFF} 将延长，如图 b 所示；

（2）输出电流　输出电流越大，关断时间 t_{OFF} 也越长，如图 c 所示。

这两个因素是同时作用于 IGBT 的。所以，当环境温度偏高时，如能适当地减小输出电流，即降额使用，可以使关断时间不超过死区时间，从而是允许的。

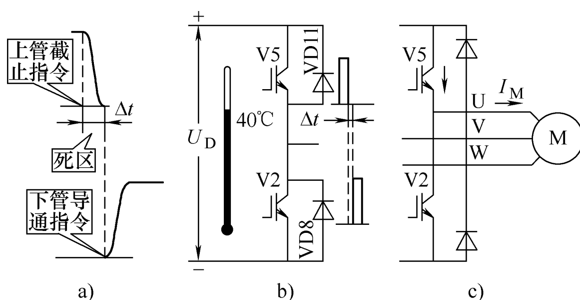


图 11-31　逆变管直通的原因

a）交替导通　b）温度的影响　c）输出电流的影响

问题 37　栅极电阻的大小对 IGBT 的工作有什么影响？

在 IGBT 的栅极 G 和发射极 E 之间，存在着结电容 C_{GE}。C_{GE} 的充、放电过程将影响 IGBT 的工作，分析如下：

1. 饱和导通时的状态　如上述，IGBT 在饱和导通时，G、E 间必须施加 12～20V 的驱动电压，这时，C_{GE} 将充电，如图 11-32 所示。

2. 由饱和导通到转为截止　当 IGBT 由饱和转为截止时，须在 G、E 间施加（－15～－5）V 的反向电压，这时，C_{GE} 将通过栅极电阻 R_G 放电，如图 b 所示。栅极电阻 R_G 的大小将直接影响 IGBT 的关断时间：

R_G 大→放电慢→t_{OFF} 长。

R_G 小→放电快→t_{OFF}短。

3. R_G 太小的影响　R_G 太小，IGBT 关断太快，则 IGBT 的 C、E 间的集-射电压 U_{CE}迅速上升，而如果 U_{CE}的上升率太大的话，又将通过集电极和栅极之间的结电容 C_{CE}产生反馈电流 i_{CG}，对 IGBT 管的关断起阻碍作用，如图 c 所示。

所以，栅极电阻的大小必须严格按照说明书选用。

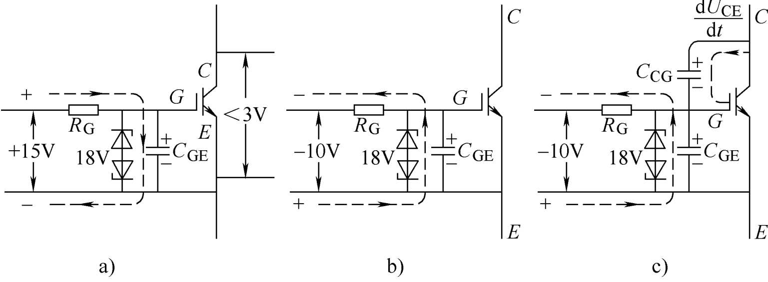


图 11-32　栅极电阻的作用

a）饱和导通的情形　b）R_G 的影响　c）R_G 太小的后果

问题 38　IGBT 的缓冲电路和 GTR 的相同吗?

在大容量变频器中，IGBT 的缓冲电路和 GTR 的缓冲电路是相同的，如图 11-19 所示。但因为 IGBT 承受电压变化率的能力远比 GTR 强，所以，在中、小容量的变频器中，缓冲电路可以简化，如图 11-33 所示：

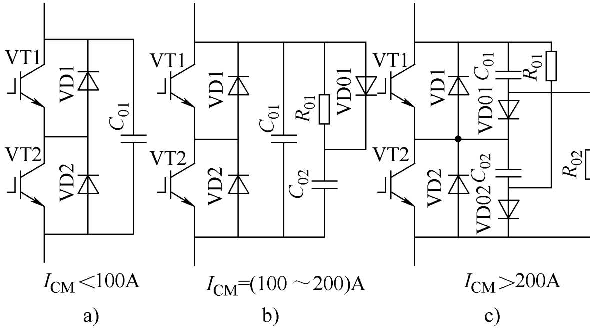


图 11-33　缓冲电路的简化

a）用于小容量　b）用于中等容量　c）用于大容量

图 a 是用于小容量变频器的缓冲电路，主要吸收在逆变管交替导通过程中出现的电压冲击。

图 b 是用于中等容量变频器的缓冲电路，其原理与图 11-19 所示的电路相同，但它针对的是整个直流电路，而不是单个的逆变管。

图 c 是用于大容量变频器的缓冲电路，其功能与图 11-19 相同，也有人认为比图 11-19 所示的电路还要优越。

11.7　IGBT 的驱动电路

问题 39　IGBT 对驱动电路有什么要求?

IGBT 在变频器里是作为开关器件来用的，并且以很高的频率不断地进行着饱和导通和截止的交替。因此，要求 IGBT 的开通（从截止到饱和导通）过程和关断（从饱和导通到截止）过程必须十分迅速。

当 IGBT 开通时，要求驱动电路提供 15 ~ 18V 的驱动电压，使 IGBT 能够迅速地饱和导通，如图 11-34a 所示。

当 IGBT 关断时，要求驱动电路提供 -10 ~ -5V 的驱动电压，使 IGBT 管能够迅速地截止，如图 11-34b 所示。

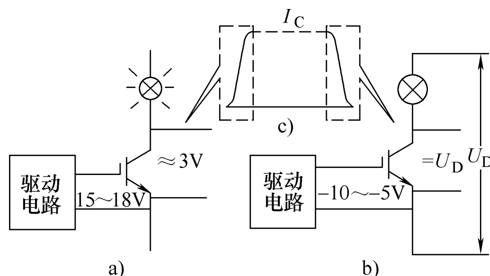


图 11-34　对驱动电路的要求

a）从截止到导通　b）从导通到截止

问题 40　驱动电路的基本构成是怎样的?

以 EXB 系列的驱动模块为例，其框图如图 11-35a 所示。工作电源施加于②脚和⑨脚之间：②脚接 +20V，⑨脚接 0V。在②脚和⑨脚之间，又有一个由 R_1 和稳压管 VS 构成的稳压电路，稳压值为 +5V，接到①脚，并与 IGBT 的 E 极相接。

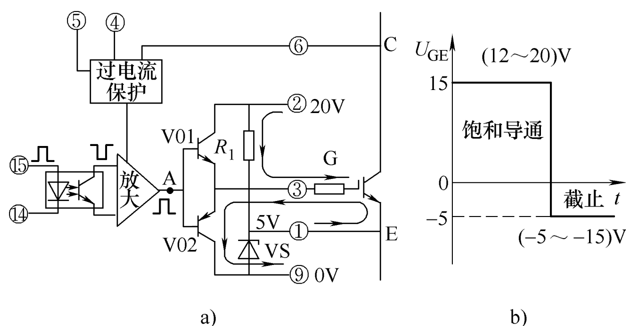


图 11-35　EXB 系列驱动模块

a）模块框图　b）输出电压

控制信号从⑮—⑭脚输入。

当⑮—⑭脚间有输入信号时，经放大后的 A 点为高电位，使 V01 导通，V02 截止，②脚的工作电压经 V01 到③脚，并输出到 IGBT 的 G 极，使 G 极电位为 +20V。因为 E 极已经和①脚的 +5V 相接，所以，U_{GE} = +15V。

当⑮—⑭脚间的输入信号为 0 时，A 点变成低电位，使 V01 截止，V02 导通，③脚经 V02 与工作电源的 0V 相接，对于 IGBT 来说，G 极为 0V，E 极为 +5V，U_{GE} = −5V。

③脚与①脚之间的输出电压如图 b 所示。

问题 41　驱动电压不足会产生什么后果？

以某 IGBT 为例，其额定数据是：击穿电压 U_{CEX} = 1200V，漏电流 I_{CEX} = 1.0mA，集电极最大电流 I_{CM} = 100A，饱和压降 U_{CES} = 2.6V，额定功耗 P_C = 600W。

现观察在不同状态下，IGBT 的功耗。

1. 饱和状态的功耗　当驱动电压为 15V，IGBT 饱和导通时，假设集电极电流为 100A，饱和压降为 2.6V，功耗为 260W，如图 11-36a 所示。

2. 截止状态的功耗　当驱动电压为 −5V，IGBT 截止时，漏电流为 1mA，集电极和发射极之间的电压为 500V，功耗为 0.5W，如图 b

所示。

3. 放大状态的功耗　当驱动电压不足，为5V时，IGBT处于放大状态，假设集电极电流为50A，管压降为252V，则功耗高达12.6kW，如图c所示。

4. 结论　如果驱动电压不足，IGBT管进入放大状态时，将必烧无疑。

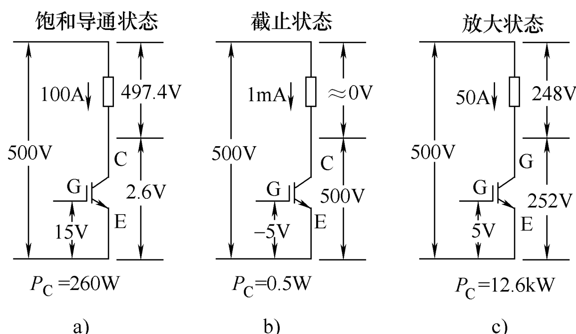


图11-36　驱动不足的后果

问题42　驱动模块还需要放大吗?

IGBT是电压控制器件，G、E间的输入阻抗很大，吸收信号源的电流很小，为什么还需要放大?

问题还是出在G、E间的结电容C_{GE}上。容量越大的IGBT，C_{GE}也越大。让我们具体计算一下所吸收的电流大小。

假设某较大IGBT的$C_{GE}=30nF$，载波频率等于10kHz，则C_{GE}的容抗为

$$X_{CGE}=\frac{1}{2\pi fC_{GE}}=530\Omega$$

C_{GE}所吸收的电流为

$$I_G=\frac{U_G}{X_{CGE}}=\frac{15}{530}=28mA$$

而驱动模块的输出电流常不足20mA（有的只有8mA），所以，

大容量变频器的 IGBT 的驱动模块是需要进行放大的，放大电路如图 11-37 所示。

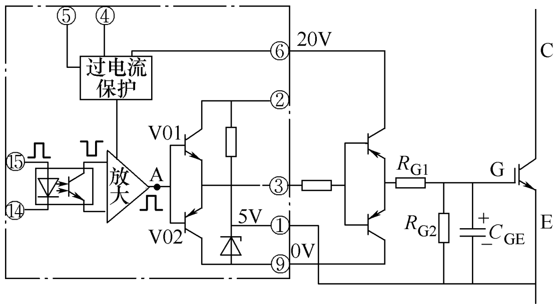


图 11-37　驱动模块的放大

问题 43　驱动电路怎样进行过电流保护？

当变频器的输出电路短路时，或者有较大冲击电流时，依靠检测电路采样，由 CPU 进行判断，会延误对 IGBT 的保护。在这种情况下，必须由驱动电路直接进行保护。

如图 11-38 所示，正常情况下，IGBT 的饱和压降只有 3V 左右，二极管 VD1 是导通的。

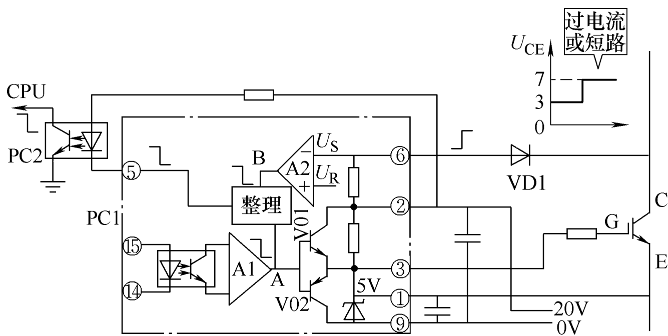


图 11-38　驱动模块的短路保护

短路时，IGBT 的 C、E 间的电压降上升至 7V，⑥脚电位上升。这时：

运算放大器 A2 的采样电压 U_S 将大于基准电压 U_R，B 点由高电位变成低电位。于是：一方面，A 点也转换成低电位，使 IGBT 迅速截止；

另一方面，⑤脚电位下降，通过光耦合管把相关信号告诉 CPU，使故障继电器动作，并显示故障代码。

问题 44　驱动电路的供电电源有什么特点？

如图 11-39 所示，下面的三个驱动电路，都和直流电路的负极相接，它们就可以共用一个驱动电源。

上面的三个驱动电路分别和 U 相、V 相和 W 相相接，要是共电源的话，将导致三相输出短路。所以，上面的三个驱动电路只能单独供电，且相互之间必须可靠绝缘。

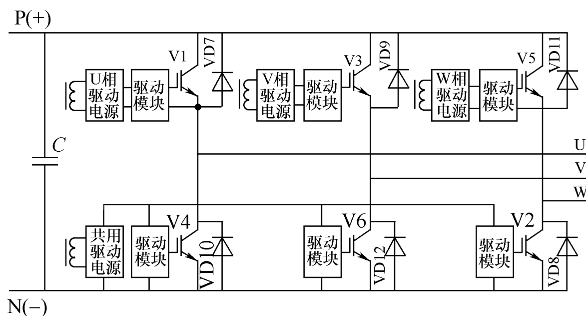


图 11-39　驱动电路的电源

问题 45　怎样检查驱动模块是否正常？

基本方法是用一个模拟信号源，向驱动模块提供 4 ~ 10mA 的信号电流，如图 11-40 所示。图中，用一个 20V 的稳压电源，串联了一个 5kΩ 的电阻，以得到 4mA 的信号电流。转换开关 SA 是控制是否有信号输入的。在模块的输出端③脚和①脚之间，接入电压表，以观察其输出电压是否符合要求。

当 SA 闭合时，驱动模块输入 4mA 的信号电流，电压表上的读数应为 15V；断开 SA，信号电流消失，电压表上的读数应为 －5V。

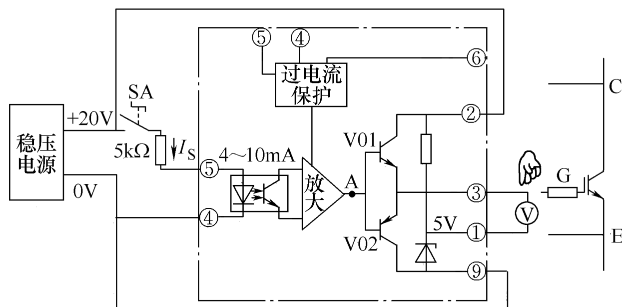


图 11-40　驱动模块的检查

问题 46　怎样检查驱动模块的带负载能力?

如问题 42 所述，驱动模块是需要有一定的带负载能力的。但在测定驱动模块的带载能力时，用户常难以得到具体数据。考虑到六个驱动模块不大可能同时损坏。所以，通常采用六个模块互相比较的办法。

在图 11-41 中，驱动模块由开关电源供电，然后从⑮脚输入 4 ~ 10mA 的信号电流。在③脚和①脚之间，接入 15Ω、3W 的电阻，用毫安表测量驱动模块的输出电流。如六个模块测出的毫安数相同，说明是正常的；如有一个或多个电流偏小，则偏小者属不正常模块。

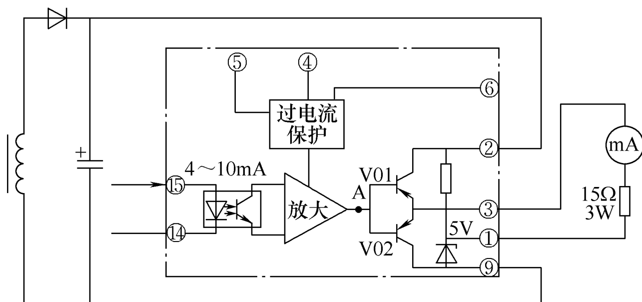


图 11-41　驱动模块带载能力的检查

ISBN 978-7-111-36242-5

封面设计／电脑制作：姚毅

定价：49.80元

地址：北京市百万庄大街22号
电话服务
社服务中心：(010)88361066
销售一部：(010)68326294
销售二部：(010)88379649
读者购书热线：(010)88379203
邮政编码：100037
网络服务
门户网：http://www.cmpbook.com
教材网：http://www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版

